

N° D'ORDRE :
63

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR
LE TITRE D'INGENIEUR-DOCTEUR

PAR

ANDRÉ PUJOL

1^{re} THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA VIBRATION DU BÉTON.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

devant la Commission d'examen.

Disp. Soutenance
1. M. 16 Sept. 1939

MM. E. DARMOIS, *Président.*

VILLEY

CROZE

} *Examineurs.*

N° D'ORDRE :
63

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGENIEUR-DOCTEUR

PAR

ANDRÉ PUJOL

1^{re} THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA VIBRATION DU BÉTON.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

devant la Commission d'examen.

MM. E. DARMOIS, *Président.*

VILLEY

CROZE

} *Examineurs.*



FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire..... M. MOLLIARD.

Doyen M. MORAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

<i>Professeurs honoraire</i>	H. LEBESQUE.	DANGEARD.	G. BERTRAND.
	Emile PICARD.	LESPIEAU.	ABRAHAM.
	Leon BRILLOUIN.	MARCHIS.	Ch. FABRY.
	GUILLET.	VESSIOT.	Léon BERTRAND.
	PÉCHARD.	PORTIER.	WINTREBERT.
	FREUNDLER.	MOLLIARD.	DUBOSCQ.
	AUGER.	LAPICQUE.	BOHN.
			RABAUD.

PROFESSEURS

M. CAULLERY ...	T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Emile BOREL ..	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PAUTHENIER ...	Physique (P. C. B.).
Jean FERRIN ..	T	Chimie physique.	DE BROGLIE ...	T Théories physiques.
E. CARTAN	T	Géométrie supérieure.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
A. COTTON	T	Recherches physiques.	P. JOB	Chimie générale.
J. DRACH	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	LABROUSTE	Physique du Globe.
Charles PÉREZ..	T	Zoologie.	PRENANT	T Anatomie et Histologie comparées.
M. GUICHARD ..	T	Analyse et mesures chimiques.	VILEY	Mécanique physique et expérimentale.
Paul MONTEL ..	T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	COMBES	T Physiologie végétale.
L. BLARINGHEM.	T	Botanique.	GARNIER	T Mathématiques générales.
G. JULIA	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	PÉRÉS.....	Mécanique théorique des fluides.
C. MAUGUIN....	T	Minéralogie.	HACKSPILL	T Chimie minérale.
A. MICHEL-LÉVY.	T	Pétrographie.	LAUGIER	T Physiologie générale.
N.	T	Mécanique expérimentale des fluides.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
A. DENJOY	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	M. CURIE	Physique (P. C. B.).
L. LUTAUD	T	Géographie physique et géologie dynamique.	G. RIBAUD	T Hautes températures.
Eugène BLOCH..	T	Physique.	CHAZY	T Mécanique rationnelle.
G. BRUHAT	T	Physique théorique et physique céleste.	GAULT	Chimie (P. C. B.).
E. DARMOIS ...	T	Enseignement de Physique.	CROZE	Recherches physiques.
A. DEBIERNE ...	T	Physique générale et Radioactivité.	DUPONT	T Théories chimiques.
A. DUFOUR	T	Physique (P. C. B.).	LANQUINE	T Géologie structurale et Géologie appliquée.
L. DUNOYER ...		Optique appliquée.	VALIRON	Mathématiques générales.
A. GUILLERMOND.	T	Botanique.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
M. JAVILLIER ...	T	Chimie biologique.	MILLOT	Biologie animale (P.C.B.).
ROBERT-LÉVY ..	T	Physiologie comparée.	F. PERRIN	Théories physiques.
F. PICARD		Zoologie (Evolution des êtres organisés).	VAVON	Chimie organique.
Henri VILLAT ..	T	Mécanique des fluides et applications.	G. DARMOIS	Calcul des probabilités et Physique-Mathématique.
Ch. JACOB	T	Géologie.	CHATTON	T Biologie maritime.
P. PASCAL	T	Chimie générale.	AUBEL	Chimie biologique.
M. FRÉCHET	T	Calcul différentiel et Calcul intégral	Jacq. BOURCART.	Géographie physique et Géologie dynamique.
E. ESCLANGON ..	T	Astronomie.	M ^{me} JOLIOU-CURIE.	Physique générale et Radioactivité.
M ^{me} RAMANT-LUCAS	T	Chimie organique	PLANTÉFOL	Biologie végétale (P.C.B.).
H. BÉGHIN	T	Mécanique physique et expérimentale.	CABANNES	Enseignement de Physique.
			GRASSÉ	Biologie animale (P. C. B.).
			PREVOST	Chimie (P. C. B.).
			BOULIGAND	Mathématiques.
			CHAUDRON	Chimie (P. C. B.).

Secrétaire A. PACAUD.

Secrétaire honoraire D. TOMBECK.

A Monsieur le Professeur E. DARMOIS

Professeur de Physique
à la Faculté des Sciences de Paris

*Hommage respectueux et témoignage
de notre gratitude.*

A Messieurs les Professeurs
Jean VILLEY et François CROZE

Hommage respectueux.

INTRODUCTION

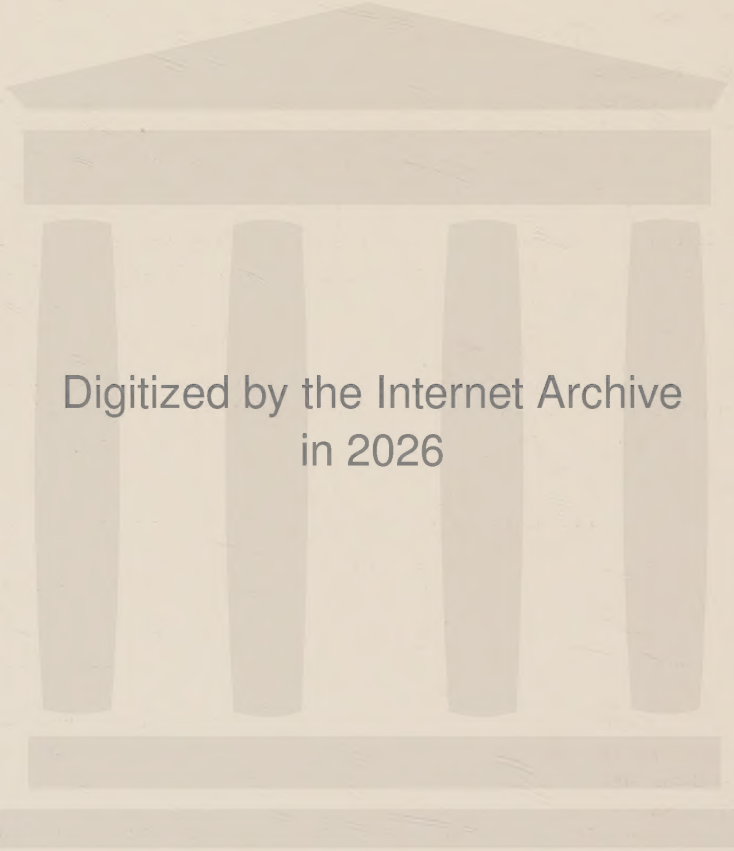
Cette thèse dont une partie a été exposée pour servir de mémoire en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Expérimentales de Sciences Appliquées, résume la plus grande partie des essais sur la nature des phénomènes issus de la mise en vibration d'un béton encore liquide et sur leurs relations avec une caractéristique physique importante de ce matériau après la prise : la résistance de rupture à l'écrasement, que nous avons entrepris sous la haute direction de M. E. DARMOIS, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris. Elle est une contribution à l'ensemble des recherches déjà faites sur ce sujet.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à M. EYROLLES, Directeur de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie, dont les Laboratoires de Recherches nous ont permis de faire ces essais, ainsi qu'à M. YADOFF et à M. GAZEL qui, par leurs précieux conseils, nous ont facilité l'entrée dans la voie qui sera exposée plus loin.

Il est très difficile de tirer des conclusions sur la nature des phénomènes qui se produisent dans la masse des bétons liquides mis en vibration, de comprendre les incidents rencontrés sur les chantiers et la plupart des articles publiés sur cette question se contentent de citer tel ou tel fait; c'est pourquoi, aidé par les travaux de M. L'HERMITE et de M. MARIANI, du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics, nous avons orienté nos recherches sur les phénomènes élémentaires en réduisant le plus possible le nombre des facteurs secondaires intervenants.

Nous pensons compléter, l'année prochaine, ces essais en soumettant des ciments aux ultra-sons.

Après avoir étudié les forces en présence au moment de la vibration nous avons essayé de préciser les conclusions qui se déduisent de la répartition de ces forces et de les appliquer à l'étude de la résistance à l'écrasement et à l'examen de quelques résultats pratiques.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

BUTS GENERAUX.

Le béton et le béton armé sont parfois mis en place par le Procédé dit « de vibration » ou celui dit « de pervibration ». On envisage ainsi d'obtenir une meilleure homogénéité, de réduire la quantité d'eau de gachage, d'augmenter la densité et la résistance, de donner un meilleur aspect aux parements, c'est-à-dire d'obtenir un procédé mécanique de mise en œuvre facilitant les coulées en coffrages étroits ou encombrés d'armatures, visant en outre à l'amélioration des propriétés fondamentales du béton, principalement de la résistance à l'écrasement.

Ce procédé comporte actuellement une gamme étendue d'appareils produisant des chocs ou des oscillations (1) et la pratique nous montre immédiatement que les résultats sont variables et ne correspondent pas toujours à ceux que l'on espérait.

Si nous considérons les différents buts que l'on s'est proposés d'atteindre, nous voyons qu'ils reviennent au fond à un seul : l'augmentation de la compacité. On sait que la compacité d'un béton ou d'un mortier est la somme C des volumes c occupés par les grains de ciment et s occupés par le « ballast » (c'est-à-dire le sable et le gravier); c et s étant en outre liés par la relation :

$$c + s + e + v = 1$$

dans laquelle e représente le volume de l'eau que contient le béton et v le volume des vides.

a) *La densité* est, en effet, une fonction linéaire de la compacité puisque, si nous exprimons les volumes en litres :

$$\Delta = C \times k + e$$

e étant constant, dans certaines limites, pour une quantité donnée d'eau de gachage.

b) *L'étanchéité* lui est aussi liée puisque la porosité est, par définition, l'inverse de la compacité et que l'on peut dire, sans qu'il y ait une relation déterminée, que l'étanchéité d'un mortier ou d'un béton est liée à sa porosité.

c) *L'aspect des parements* est d'autant meilleur que le ballast est mieux rangé, que les cavernes formées contre les parois des moules par le frottement sont moins nombreuses et plus petites, ce qui revient là aussi à réduire, au moins dans le voisinage des parois, le volume v et par suite à augmenter $c + s$.

(1) Si un appareil communique aux éléments directement en contact avec lui des mouvements sinusoïdaux, ou à peu près sinusoïdaux, nous parlerons, dans cet exposé, d'oscillations; dans le cas contraire, d'impulsions discontinues, nous parlerons de chocs, le mot « vibration » restant une appellation générale comprenant à la fois les chocs et les oscillations.

d) *La résistance*, à l'écrasement, bien que liée par une fonction plus compliquée, dépend encore de la compacité. L'augmentation de résistance croît d'autant plus rapidement que la compacité est plus grande et le gain est très fort dès que l'on atteint une compacité de 80 %. Plusieurs formules concordantes traduisent cette loi : nous citerons celle de M. FERRET, qui, ayant donné en première approximation :

$$R_t = K_t \frac{c}{e + v} \qquad \text{donna ensuite :}$$

$$R_t = K_t \left(\frac{c}{1 - s} \right)^2 \qquad \text{dans laquelle, en}$$

dehors des symboles déjà vus, R_t représente la résistance à l'écrasement au bout du temps t et k_t un coefficient valable pour l'instant, t caractérisant chaque ciment. Cette formule peut se transformer à l'aide de la relation :

$$c + s + e + v = 1$$

de façon à mettre en évidence la compacité $c + s$.

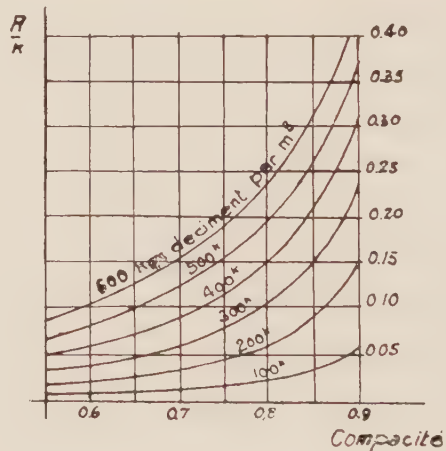
$$R_t = K_t \left(\frac{c}{1 - (c + s) + c} \right)^2 \qquad (1)$$

On a d'ailleurs les courbes ci-dessous :

figure 1

*Influence de la compacité
sur la résistance à la
compression.*

*κ est un coefficient
dépendant du ciment
(M^r Ferret)*



(1) On peut tout de suite faire remarquer que dans cette formule, le facteur $\frac{1}{1 - C + c}$ intervient à la puissance 2; c étant donné (dosage connu), nous avons $\left(\frac{1}{A - C} \right)^2$ qui est une fonction croissante dont la dérivée par rapport à c

$$Y'_c = \frac{2}{(A - C)^3}$$

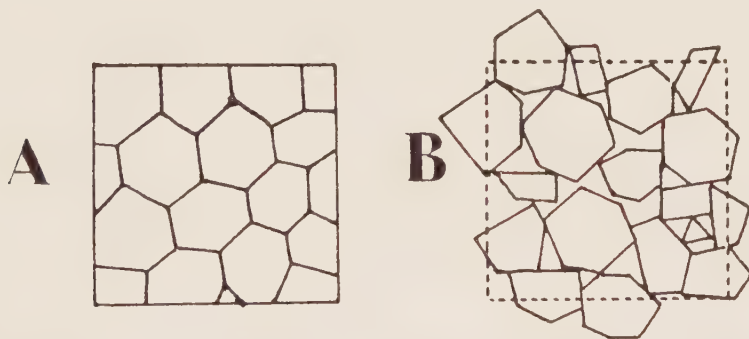
est toujours positive, puisque c étant compris entre 0 et 1. La dérivée seconde $Y''_c = \frac{6}{(A - C)^4}$ est aussi toujours positive. On a donc intérêt à gagner la zone des C voisines de 1.

Donc on peut dire que le but à atteindre au moyen de la vibration est, en définitive, une meilleure compacité.

FACTEURS PRINCIPAUX DE LA COMPACITE.

Dans une étude simplifiée, les facteurs qui interviennent pour l'obtention d'une bonne compacité, sont de deux sortes : ceux qui intéressent les dimensions des éléments constituant le ballast et ceux qui intéressent la mise en place correcte de ces différents éléments. En effet, si nous supposons par exemple que l'on prenne une pierre sans géode ni fossile, parfaitement pleine, et que l'on casse cette pierre en morceaux de différentes grandeurs, il existe une façon et une seule de les regrouper pour obtenir, en fin de travail, un solide identique au solide initial, de compacité $C = 1$. Par contre, si nous retirons certains morceaux et que nous les remplaçons par d'autres de même volume, mais de dimensions différentes, la compacité obtenue ne serait plus 1, mais inférieure à 1. Si, reprenant une autre fois les morceaux du début, nous les rangeons non plus à la façon d'un puzzle, mais dans n'importe quel ordre, la compacité obtenue ne sera plus 1, mais encore inférieure à 1. Il existe donc bien deux séries de facteurs : les dimensions et l'ordre des morceaux : la première donnera les problèmes de la « granulométrie », la seconde, ceux de l'arrangement que résolvent partiellement différentes méthodes. (1).

figure 2



(1) Dans une étude plus détaillée, il faudrait encore faire intervenir au moins une autre catégorie de facteurs : la forme des grains.

On sait, en effet, que si l'on compare des sables et des argiles de même composition granulométrique, les effets capillaires sont cependant différents : la cohésion est plus grande dans le cas des argiles, la différence venant de la forme plate des grains de silicate de l'argile.

Si l'on compare aussi la compressibilité d'un sable normal siliceux et celle d'un sable dans lequel on incorpore une certaine proportion de grains de mica, on trouve encore des résultats très différents. Dans le deuxième cas d'allure des variations de la compressibilité devient semblable à celle qui est observée avec des argiles.

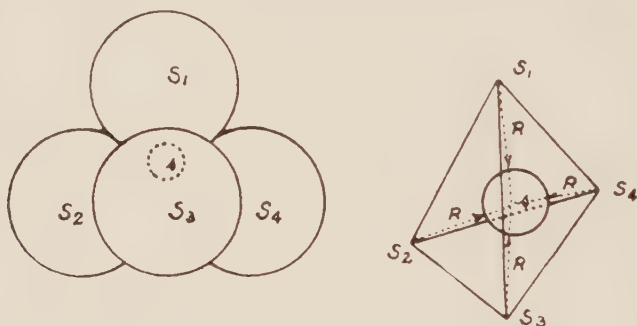
On sait enfin que les mesures de la plasticité des bétons composés de ballast roulés et de celles des bétons composés de ballast à arêtes vives sont différentes.

Notre travail ayant pour but d'étudier certains problèmes de la seconde série, nous passerons rapidement sur ceux de la première mis au point depuis déjà un certain temps par les principes de M. FERET, nous n'en dirons que ce qui est nécessaire pour rassembler les éléments qui interviennent dans la discussion des résultats relatifs à une méthode d'arrangement du ballast : la vibration et la pervibration.

LIMITE THEORIQUE DE LA COMPACITE DES BALLASTS.

Si l'on considère des grains sphériques de mêmes dimensions, ils laissent entre eux dans la position la plus favorable un vide important, voisin du tiers du volume total : pour un mélange de granulométrie uniforme $C = 0,741$. Si nous introduisons dans l'espace vide des sphères tangentes aux quatre grandes sphères voisines, le vide diminuera et ainsi de suite; on conçoit qu'il soit possible d'arriver à une compacité meilleure, voisine de 0,800 (*figure 3, note 2.*)

figure 3



(1) Dans le cas d'un mélange ternaire : ballast, eau, ciment, il faut encore considérer une limite théorique de compacité valable pour le ciment (M. FREYSSINET).

(2) Si l'on considère la porosité des volumes remplis de sphères égales, c'est-à-dire le rapport du volume des vides au volume total, on sait que les valeurs trouvées sont, dans le cas le plus favorable 0,259 et, dans le cas le moins favorable 0,476. En effet, d'après l'étude de SLICHTER, si d est le diamètre des sphères, et si nous considérons le rhomboedre dont les côtés joignent deux à deux les centres de 8 sphères voisines (*figure*), les faces sont des losanges d'arrête d avec des angles θ et $\pi - \theta$

Le volume du rhomboedre est $d^3 (1 - \cos \theta) \sqrt{1 + 2 \cos \theta}$

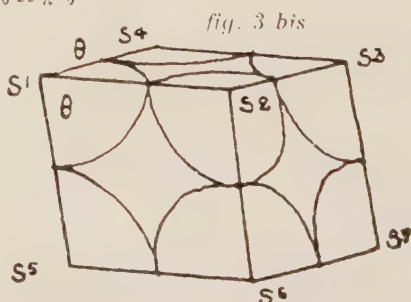
celui des 8 sphères est : $1/6 \pi d^3$

D'où la porosité :

$$1 - \frac{\pi/6 d^3}{d^3 (1 - \cos \theta) \sqrt{1 + 2 \cos \theta}}$$

elle est maximum pour $\theta = \frac{\pi}{2}$

et minimum pour $\theta = \pi/3$ d'où les valeurs 0,259 et 0,476.



Plaçons-nous dans le cas le plus favorable ou $\theta = \pi/3$, nous pouvons décomposer chaque rhomboedre en 6 pyramides ayant pour face des trian-

Dans le cas d'un ballast naturel, les grains ne seront plus sphériques, mais de formes quelconques; cependant, on conçoit, là encore, qu'il soit possible d'obtenir, par un dosage précis des éléments, une compacité variant entre 0,700 et 0,850, c'est-à-dire entrer dans la zone où les gains de résistance sont très grands (*c. f. figure 1*). Plus la granulométrie se rapproche de la granulométrie idéale et plus elle est dite « raide ».

Mais plus la granulométrie est raide et plus il est difficile de la rendre effective par un bon arrangement c'est-à-dire, plus il est difficile de faire placer chaque élément à l'endroit et dans le sens qui conviendrait parce que cet élément est obligé alors de parcourir un chemin bien plus grand que celui qu'il aurait à faire dans le cas où il y aurait soit beaucoup de grains semblables, soit beaucoup de places semblables. Plus le chemin est grand et plus la résistance qui s'oppose à la réalisation de la compacité maximum est grande. Si nous reprenons les sphères du cas précédent, et si nous nous plaçons dans l'hypothèse d'un diamètre unique, une simple secousse placera comme il convient toutes les sphères; mais dans l'hypothèse de diamètres variés, il n'est pas évident que l'on puisse obtenir immédiatement la compacité correspondante.

Il faut donc un compromis entre la granulométrie optimum théorique et celle qui, comportant un certain nombre de grains identiques, demande le minimum d'efforts au moyen de réalisation. On conçoit dès maintenant que le ballast doit être choisi en fonction du procédé de mise en place envisagé.

ETUDE DE LA VIBRATION ELEMENTAIRE

a) *Cas d'un grain isolé.* — Afin d'étudier le mécanisme de la réalisation d'une bonne compacité au moyen de la vibration, examinons le mouvement d'un grain de ciment ou de ballast.

Note 2 page 12 (*suite*)

gles isocèles et dans chaque face, placer une sphère tangente aux trois autres, de diamètre $d_1 = d \frac{2 - \sqrt{3}}{\sqrt{3}}$ soit 0,156 d — le volume des sphères

intérieures à chaque pyramide est $\pi/6 \times \frac{4}{2} (0,156d)^3$ au total

$12 \frac{\pi}{6} (0,156d)^3$ la porosité devient :

$$p = 1 - \frac{\pi/6 [1 + 12 (0,156 d)^3]}{1/\sqrt{2}} = 0,225$$

On peut encore considérer une sphère au centre de chaque pyramide et tangente aux quatre sphères des sommets :

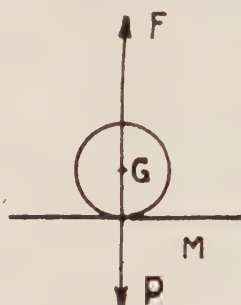
son diamètre est de $d_2 = \frac{\sqrt{3} - \sqrt{2}}{\sqrt{3}} d = 0,212 \times d$ et si l'on tient compte des volumes de ces 6 sphères, on arrive à

$$p = 1 - \frac{\pi/6 [1 + 0,0456 + 0,0270]}{\frac{1}{\sqrt{2}}} = 0,205 \text{ qui est à peu près la limite}$$

vers laquelle on tend avec un nombre infini de sphères.

Supposons ce grain placé sur la plateforme d'un appareil vibreur en contact direct avec lui et recevant des oscillations (le diagramme espace-temps du mouvement de la plateforme est supposé sinusoïdal) (figure 4).

figure 4



On peut noter que la supposition d'un mouvement sinusoïdal ne diminue pas la généralité des conclusions puisque l'on peut toujours considérer l'élongation d'un mouvement périodique de période T non sinusoïdal, représenté par une courbe de forme quelconque, comme la somme algébrique de mouvements sinusoïdaux de période T , $\frac{T}{2}$, $\frac{T}{3}$ etc..., dont il suffit de choisir convenablement le nombre, les amplitudes et les phases.

$$x = a_1 \sin (\omega t - \varphi_1) + a_2 \sin (2 \omega t - \varphi_2) + a_3 \sin (3 \omega t - \varphi_3) + \dots$$

(Théorème de FOURIER).

Considérons donc simplement le mouvement fondamental :

$$x = a \sin \omega t,$$

la vitesse d'un point M de la plateforme sera :

$$\frac{dx}{dt} = -a \omega \cos \omega t$$

Supposons un mouvement vertical ascendant du point M , un grain en contact m , recevra alors une accélération connue. Lorsque sa vitesse sera supérieure à celle de M , il aura tendance à poursuivre un mouvement vertical ascendant, mouvement uniformément retardé par la pesanteur qui est la seule force qui agisse sur lui à ce moment, à condition toutefois que la période soit suffisamment petite; la particule m décrit donc :

a) Une portion de sinusoïde;

b) Une portion de parabole,

pendant cette deuxième partie, le point M continue à vibrer selon une loi sinusoïdale, si bien que m ne revient en contact qu'après un certain temps.

L'ensemble de ces mouvements peut se symboliser dans les équations suivantes qui fixent la position du point M , de la sinusoïde ou m quitte la courbe fondamentale, l'instant t_1 où se produit cet abandon est

obtenu en écrivant que l'accélération de la pesanteur est égale à celle qui est communiquée par le plateau c'est-à-dire :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -a \omega^2 \sin \omega t = -g \quad \text{soit } \sin \omega t = \frac{g}{a \omega^2}$$

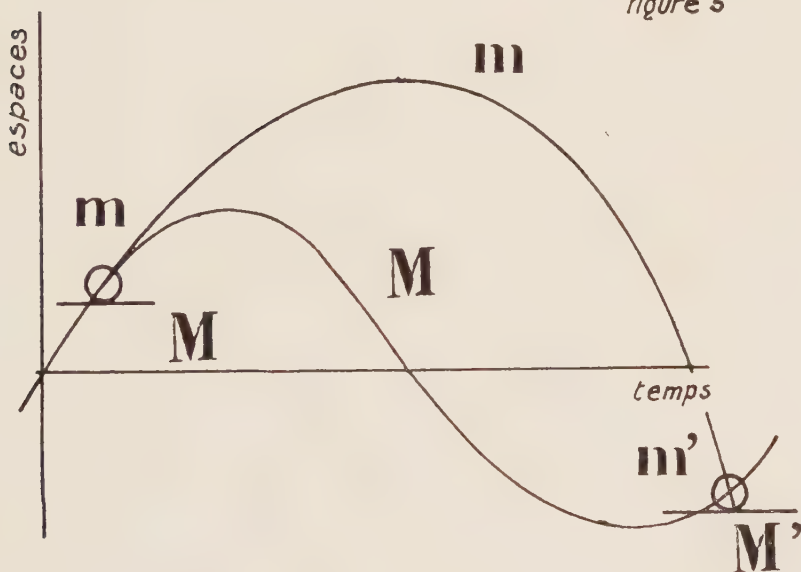
ou, en introduisant la période T et l'amplitude a :

$$t = \frac{\arcsin \frac{gT^2}{4a\pi^2}}{\frac{2\pi}{T}}$$

à partir de cet instant le point m est animé d'un mouvement vertical, sous l'influence de la pesanteur; sa vitesse initiale est donnée par :

$$\frac{dx}{dt} = -a \omega \cos \omega t \quad \text{avec } t = \frac{\arcsin \frac{gT^2}{4a\pi^2}}{\frac{2\pi}{T}}$$

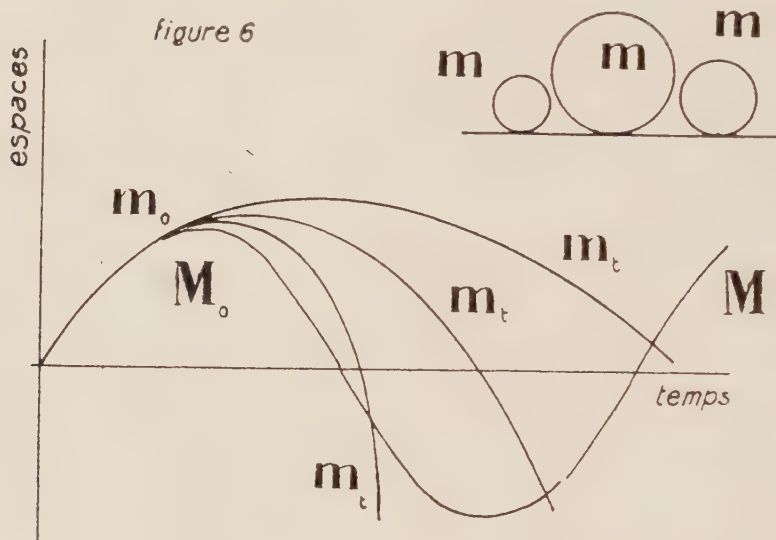
figure 5



b) *Cas de plusieurs grains.* — Supposons maintenant que l'on réunisse plusieurs grains de ciment ou de ballast soit : m, m_1, m_2 , leur masse. Les différents grains commencer à décrire encore une partie de sinusoïde, puis une partie de parabole. Or le temps t , est indépendant de la masse de m , mais les grains décrivent des paraboles différentes selon qu'il s'agit de m, m_1 , ou m_2 (figure 5).

En aucune façon on n'a réalisé un rapprochement des grains et par conséquent avec ces seuls éléments le problème n'est pas résolu.

Dans le cas où les grains ne sont soumis qu'à la seule force de pesanteur, c'est-à-dire qu'à une force pratiquement indépendante de x , deux conclusions peuvent donc être énoncées, que vérifient des essais simples faits sur des éléments placés dans ces conditions :



1° Les vibrations fournies par la plateforme du vibreur à la fréquence F et dont l'amplitude est a , n'ont aucune raison de se transmettre aux grains immédiatement voisins à la fréquence F et avec l'amplitude a , les impulsions que ceux-ci reçoivent sont désordonnées et n'obéissent pas à une loi périodique. Selon les lois du hasard, ces impulsions seront maxima ou nulles ou comprises entre ces deux limites. Ce n'est qu'au bout d'un très grand nombre d'oscillations du plateau que l'on pourra raisonner sur un élément certain : à ce moment la fréquence des chocs tendra, dans leur ensemble, vers la probabilité des rencontres optima entre m et M , selon le théorème de BERNOULLI. Se placer dans ce cas signifie accepter au minimum un très grand affaiblissement du rendement de la vibration (1).

2° Il n'existe une position d'équilibre des différents grains que si la fréquence des impulsions est suffisamment basse pour que l'ensemble des grains puisse avoir un mouvement sensiblement conforme à celui de la plateforme.

(1) C'est encore ce que l'on peut constater expérimentalement en plaçant un élément de gravier sur un lit de grains de diamètre bien plus petit : le mouvement de cet élément recevant l'impulsion résultante est différent de celui qu'il prendrait avec une impulsion directe, la période des impulsions moyennes étant différente dans les deux cas.

Si les grains sont entassés dans un récipient, les frottements et la pesanteur améliorent cette situation, mais il faut encore que les impulsions restent dans certaines limites.

Là encore, le rendement de la vibration est très faible et une application prolongée peut diminuer les résultats.

En effet nous ne pouvons pas déceler dans ce cas une vibration proprement dite de l'ensemble des grains, car la compacité n'augmente qu'en raison de chocs analogues à ceux qui se produisent dans un tassement manuel. Mais comme on ne réalise pas la position de stabilité maximum, les grains sollicités par la pesanteur, des résistances de « viscosité » et des quantités de mouvements différentes ont tendance à se classer par catégories selon un phénomène complexe, les grains de gros diamètres allant soit vers le bas, soit vers le haut : c'est le phénomène de ségrégation.

Nous pouvons remarquer encore que si l'on considère des grains enfermés dans un récipient, la plate-forme vibrante reposant à la partie supérieure des grains (*figure 7*), il n'y a aucune raison pour que les grains tendent vers une position d'équilibre plus stable que la précédente.

figure 7



C'est le cas des appareils vibrateurs posés à la surface des bétons tels que les poutres vibrantes, vibro pilonneuses, etc.

Il faut donc soumettre le mélange à d'autres forces qui obligent d'une part les grains à garder un contact plus long avec la plaque vibrante et qui, d'autre part, augmentent la stabilité de la position d'équilibre ou de semi-équilibre, la vibration n'intervenant que pour diminuer les frottements et accélérer l'obtention de la position stable.

ETUDE DES MELANGES BINAIRES SABLE-EAU.

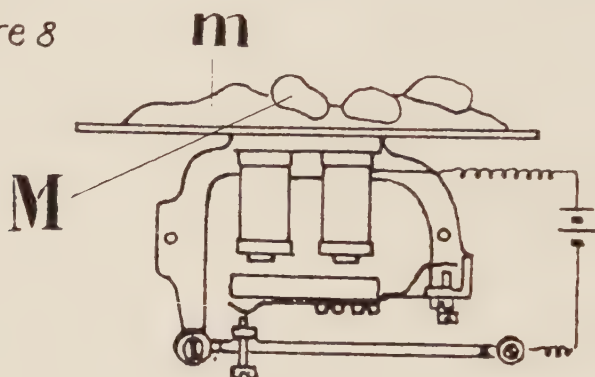
Si dans les essais dont nous avons parlé plus haut, nous versons sur les grains disposés sur la plateforme (c. f. dispositif *figure 9*) quelques gouttes d'une huile fluide, le résultat obtenu est tout à fait différent. Les grains se rassemblent et forment une plaque cohérente. Ici, en effet, intervient une force de cohésion qui résulte de la tension superficielle de l'huile dans les conditions de température de l'expérience.

Nous pouvons nous reporter pour comprendre ces actions aux méthodes employées pour la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des sols. Les géotechniciens distinguent en effet deux cohésions : la cohésion vraie et la cohésion apparente. On sait que

pour eux la cohésion est la force d'attraction qui fait que les particules ne se détachent pas les unes des autres et dont la valeur permet de faire une transition entre les corps solides et les massifs pulvérulents. La cohésion se mesure par cisaillement sous charge nulle.

La cohésion vraie est une valeur indépendante de la teneur en eau des échantillons : elle provient de l'attraction moléculaire; évidemment cette action n'est perceptible que dans le cas d'éléments très petits (sables de Fontainebleau).

figure 8



La cohésion apparente est au contraire, une grandeur essentiellement variable.

On admet en général que la cohésion vraie se manifeste sur des grains de 1/10 de millimètre. Tous les sols ayant mêmes grosseurs de grains ont la même cohésion vraie; par contre la cohésion apparente dépend de la forme des grains (différence de cohésion entre l'argile et le sable).

Cette liaison capillaire se manifeste selon le schéma suivant :

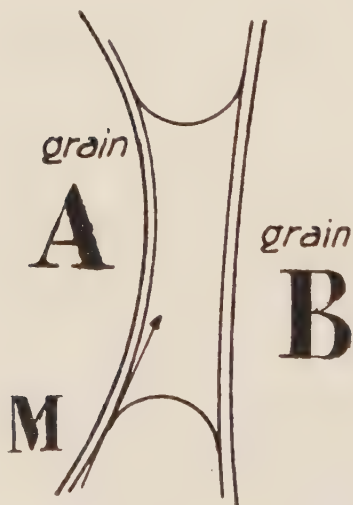
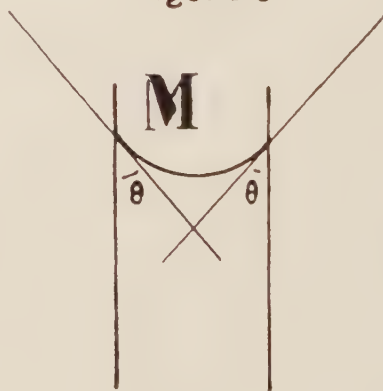


figure 9



Les ménisques se raccordent suivant un angle θ à la surface des grains, ou plus exactement à la couche liquide qui adhère à ceux-ci. Dans le cas de l'eau, $\theta = 0$.

Il en résulte ce que M. FREYSSINET appelle une étreinte de retrait. L'étreinte élémentaire est donnée par : « La loi de LAPLACE » :

$$\pi = A \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

π étant la différence de pression entre les surfaces du ménisque, R_1 et R_2 étant les rayons de courbure principaux du ménisque.

Si l'on suppose une répartition moyenne des pleins et des vides constante et isotrope, dans certaines conditions dans les vides mouillés l'eau exerce sur les parois opposées des vides, des tractions normales dont la résultante sur l'élément de surface est :

$$\Phi = \pi \omega_m$$

si ω_m est le rapport des volumes mouillés à l'unité (1).

Les phénomènes capillaires déterminent un système de forces intérieures rigoureusement identique à celui qui résulterait d'une pression normale et uniforme s'exerçant de l'extérieur vers l'intérieur sur toute la surface du corps.

Il est opportun maintenant, d'étudier, en outre, le frottement interne de la masse vibrée.

Les courbes obtenues dans une série d'essais destinés à mesurer la densité apparente du « mixte » sable-eau en fonction de la proportion d'eau contenue doit pouvoir nous fournir une indication sur les valeurs ou tout au moins sur les variations relatives du coefficient de frottement interne.

Les résultats généraux de l'étude du frottement entre deux corps solides donnent certains éléments : d'après la loi de COULOMB, la résistance due à un frottement est proportionnelle à la résultante normale des pressions et le coefficient de frottement de la mécanique rationnelle (rapport de la résistance de glissement à la pression) est indépendant :

- a) De l'étendue de la surface de contact;
- b) De la vitesse de déplacement des surfaces;
- c) De la pression.

On l'exprime par l'égalité $F = f \cdot p$ ou f est une constante. D'autre part les travaux expérimentaux de W. B. et T. K. HARDY ont conduit ceux-ci à montrer que plusieurs facteurs interviennent.

Le coefficient f est maximum quand les surfaces en contact sont rigoureusement propres et parfaitement polies. Son origine est alors l'attraction moléculaire, il dépend donc uniquement de la grandeur de la surface réelle sur laquelle s'exerce l'effort, qui dépend elle-même, les surfaces étant toujours plus ou moins rugueuses, de la résistance mécanique de la matière la moins dure de celles qui constituent les deux solides en présence.

(1) M. FREYSSINET : « Une révolution dans la technique du béton ». — EYROLLES, éditeur.

Dans le cas, évidemment plus fréquent, où les surfaces ne sont pas absolument propres, par suite de la présence soit de poussières, soit de condensations, le coefficient de frottement diminue beaucoup :

1^{er} Cas : La pellicule séparant les deux corps est formée par un liquide diminuant le frottement (huile de graissage).

2^e Cas : La pellicule est formée par un liquide ne diminuant pas le frottement ou même annulant l'effet de graissage (alcool, éther, benzine, eau en particulier).

Dans le cas de graissage par pellicule le coefficient de frottement augmente quand le poids moléculaire des lubrifiants augmente, on peut alors considérer la résistance au frottement comme due à une liaison physico-chimique et non à une résistance purement mécanique.

3^e Cas : Le graissage peut se faire par le seul contact du corps et de la vapeur du lubrifiant.

Le coefficient de frottement est minimum quand la tension de vapeur est saturante.

Dans le cas de surfaces rugueuses, il peut arriver, si la pression est suffisante, que la pellicule soit percée par les aspérités, dans ce cas le coefficient de frottement croît. Par contre jusqu'à une certaine pression le coefficient reste constant.

Si la pellicule n'est pas percée, la résistance au frottement est celle de la pellicule. Comme, lorsque la pression croît les molécules de la pellicule tendent à se séparer de celles des corps solides, et comme le mouvement ne peut être rapide, il en résulte que le coefficient de frottement croît si la vitesse relative des deux corps croît également et cela d'autant plus que les déformations mécaniques des aspérités ne peuvent être instantanées.

Dans le cas d'une pression nulle la résistance au glissement n'est pas nulle, elle résulte dans le cas d'une pellicule ou d'un gaz adsorbé des échanges moléculaires et de la résistance des films. Ce frottement à pression nulle est la cohésion vraie dont nous avons déjà parlé.

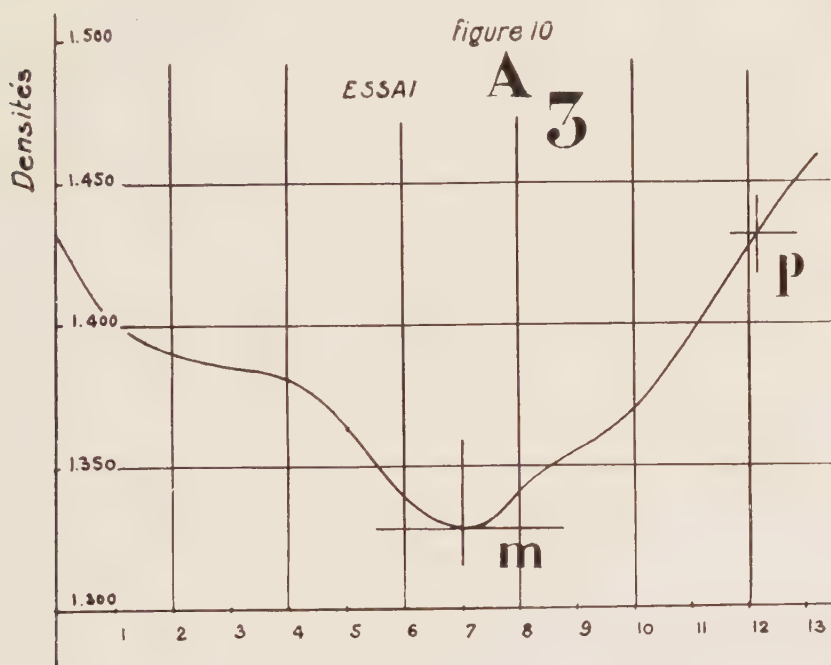
Si nous passons maintenant à un ensemble de petits corps solides frottant les uns sur les autres, nous avons un massif pulvérulent, mais il convient de considérer en outre les mouvements relatifs de translation et de rotation.

Dans ce cas la résistance au frottement dépend non seulement de la pression et de la nature des surfaces en contact mais aussi de l'enchevêtrement des grains : Si des plans de schistosité existent dans la masse, la résistance sera minimum le long de ces plans. Il faut remarquer que des grains de sable ne peuvent se séparer que moyennant une augmentation temporaire du volume des vides du sable (Expérience de Reynolds) : le long des plans de schistosité, le travail de gonflement résultant des mouvements de roulement de grains ne sera donc pas nécessaire.

Si un mouvement a déjà eu lieu les grains conservent sensiblement leur orientation et les glissements ultérieurs sont facilités.

Il n'existe donc pas à proprement parler de coefficients de frottement interne pour un matériau pulvérulent donné; M. CAQUOT montre cependant, en s'appuyant sur le calcul de probabilités, que ce coefficient peut osciller entre deux limites (1). (2).

Les résultats précédents donnent une idée d'ensemble de la nature des phénomènes de frottement interne. S'il est impossible de déterminer une valeur précise : Coefficient de frottement interne, il est possible cependant d'en avoir une représentation grossière. Prenons par exemple un sable de Seine composé exclusivement de grains de 2 m/m à 1 m/m et un liant formé de 0,2 à 0 m/m (liant) et mesurons le poids de un litre de ce mélange auquel nous ajoutons successivement 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 pour 100 d'eau (en poids). La mesure est remplie en réalisant un tassement minimum constant, nous obtenons la courbe suivante :



Cette courbe présente un minimum pour un pourcentage d'eau d'environ 7 %. L'abscisse de ce minimum varie avec la grosseur des grains. Ceci peut d'ailleurs s'expliquer en considérant la variation de l'étreinte capillaire qui augmente jusqu'à ce que tous les ménisques soient formés puis diminue quand les rayons de courbures des ménisques augmentent (fig. 11 et 29) conformément à la formule.

$$\pi_e - \pi_a = \frac{t}{r}$$

(1) BUISSON « Etude des fondations » (Travaux).

(2) CAQUOT « Equilibre des massifs pulvérulents ». — Gauthier-Villars.

ou π_e , est la tension du liquide.
 π_a , celle de l'atmosphère.
 l , la tension superficielle.
 r , le rayon du ménisque.

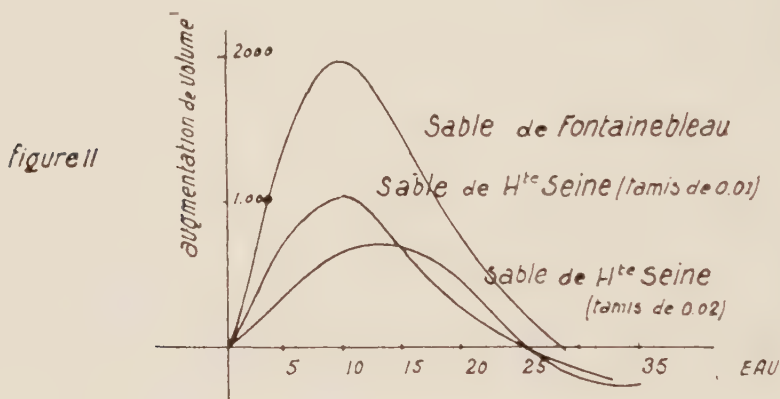
Elle résume les résultats ci-dessous (1).

ESSAI A/B 5.

TABLEAU N° 1

eau	densités	eau	densités
1	1.398	8	1.335
2	1.389	9	1.357
3	1.380	10	1.370
4	1.377	11	1.398
5	1.370	12	1.425
6	1.338	13	1.450
7	1.328	14	

Mais dans ces variations de la densité apparente (2), la densité absolue du mixte varie et tend vers 1 de sorte que l'indice des vides, c'est-à-



(1) L'Union Technique du Bâtiment et des Travaux Publics avait entrepris en 1926, au Laboratoire de l'Ecole des Travaux Publics, une série d'essais sur les variations des volumes des sables siliceux employés dans la construction. Les conclusions données par M. Guilmo to étaient les suivantes :

a) Le volume d'un sable sec augmente progressivement par hydratation et le maximum est atteint pour une proportion d'eau de 10 % environ.

b) Quand la proportion d'eau augmente au-dessus de 10 %, le volume du sable diminue et il reprend la grandeur initiale du volume du sable sec quand la proportion d'eau atteint environ 25 %.

c) L'importance des augmentations de volume sous l'influence de l'eau dépend de la composition granulométrique des sables : elle est d'autant plus grande que la proportion des grains fins est plus élevée.

d) Quand la proportion d'eau dépasse 25 %, le volume des sables de haute Seine devient inférieur au volume initial et la contraction est d'autant plus forte que la proportion des grains fins est plus faible (fig. 11).

Pour un même sable des poids égaux occupent des volumes égaux quand le sable est inondé, quel que soit son tassement ou son foisonnement dû à l'humidité.

(2) Ici le terme densité apparente représente le poids de l'unité de volume apparent dans les conditions expérimentales.

dire le rapport du volume des vides au volume des parties solides du ballast n'est pas la seule cause intervenant. Pour remédier à ces variations secondaires, nous pouvons retirer aux résultats le poids de l'eau incluse et les ramener à l'unité de volume (1).

Les mouvements des différents grains qui ont tendance à se produire dans la masse, sont freinés par la résistance interne s'opposant au tassement.

Les grains sont serrés les uns sur les autres par une force résultant de l'action des grains voisins, celle-ci résultant à son tour de la force de retrait, de la pesanteur ou d'autres forces appliquées à la partie supérieure du moule contenant le mixte (pression atmosphérique...). Cette force résultante peut être décomposée comme on le fait généralement en mécanique, en :

a) une pression normale à la surface de contact

et b) une force tangentielle F_n et l'on a $F_n = f p_n$ pour qu'il y ait mouvement, il faut que $F_n > f p_n$ et pour l'ensemble du mélange on a la relation statistique résultante

$$F \geq \Phi P$$

Mais Φ est fonction de la compacité en raison des propriétés déjà vues du coefficient de frottement interne d'un massif pulvérulent, si bien que la courbe obtenue (fig. 12) est une exagération de la courbe

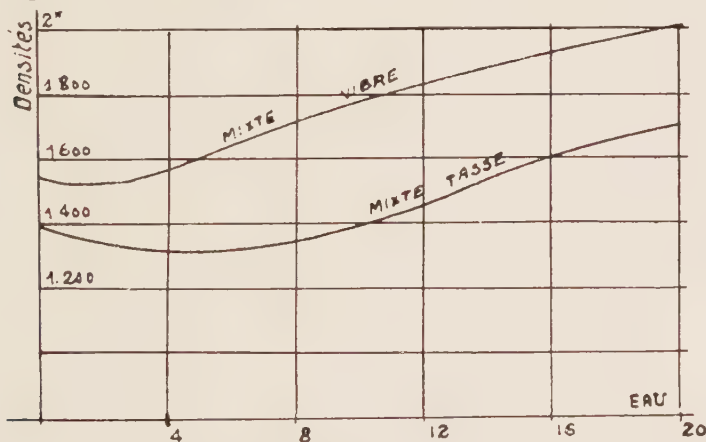


figure 12

donnant la variation du coefficient de frottement; en sorte que nous avons bien une image statistique des variations de ce coefficient. Nous en déduirons donc qu'à une échelle quelconque, la courbe suivante donne ces variations (2).

(1) Il est possible de mesurer directement l'angle de frottement interne. Cette expérimentation due à CASSAGRANDE donne surtout de bons résultats pour l'argile : il existe une relation entre $\tan \varphi$ et l'indice de plasticité (ALTERBERG).

(2) De façon plus générale, on peut dire que le frottement est lié à l'indice des vides par la relation : $\Phi = \alpha f(v)$ où α est un coefficient qui dépend de la forme des grains, de la nature de leur surface, de la granulométrie, du degré d'humidité; $f(v)$ est pratiquement indépendante des qualités de l'agrégat, elle peut être considérée comme une constante.

Mais nous pouvons encore considérer cette courbe, puisque le frottement est dans cette étude simplifiée, la seule cause qui s'oppose à la réalisation d'une bonne compacité et par conséquent la seule force « négative » qui travaille, comme la représentation de l'énergie nécessaire ou en admettant que le temps d'application des forces « positives » soit constant, comme la représentation de l'intensité des forces positives, c'est-à-dire dans les essais de vibration comme la représentation de l'intensité des impulsions.

Or, pratiquement, les premiers essais ont été faits en gardant cette intensité constante; logiquement, les résultats devaient se déduire de la courbe de la figure 12.

La courbe représentant la variation de densité du mixte après vibration pourrait être déduite des observations suivantes :

1° Elle serait la courbe parallèle à la courbe de la densité du mixte tassé (tassement constant aussi faible que possible).

2° Dans la zone B des fortes teneur en eau, elle serait (courbe 2), inférieure à cette première courbe, parce qu'à ce moment le coefficient de frottement devient très faible et par conséquent le tassement se rapproche du tassement maximum.

3° Dans la zone A des faibles teneur en eau, la courbe obtenue devrait être en-dessous de la courbe théorique, puisque l'énergie véritable est inférieure à l'énergie théorique.

4° Dans la zone B, il n'y a pas de raison *a priori* pour qu'elle ne soit pas au-dessus de la courbe 2, puisque l'énergie véritable est supérieure à l'énergie théorique.

5° Nous pouvons admettre grossièrement que P reste sur la courbe théorique.

Le procédé expérimental que nous avons utilisé dans ces essais comporte les réalisations suivantes :

Dans une première série d'essais, nous avons utilisé un sable de Seine (1) dans les proportions suivantes :

Diamètre des grains	5 à, 2 m/m	2-0,5	0,5-0
Sable A	0,4	0,4	0,2
Sable B	0,2	0,4	0,4

en ajoutant une proportion d'eau variant entre 0 à 20 %.

L'appareil utilisé pour produire les vibrations est une table vibrante actionnée par un moteur électrique.

Le mélange sec d'un poids total de 2 kilos, bien homogénéisé au préalable, est placé dans un moule A étalonné d'une capacité de 1 litre et nous mesurons alors la *densité apparente*, en ayant soin de réaliser un tassement aussi faible et aussi constant que possible (les conditions de tassement sont celles qui sont généralement admises pour la mesure de la densité apparente des sables; elles se rapprochent de celles

(1) M. FERRET a préconisé dans les essais de matériaux destinés aux travaux publics, le classement des sables (un sable est composé de grains de 0 à 5 mm.) en trois catégories 0 à 0,5, 0,5 à 2, 2 à 5 mm.

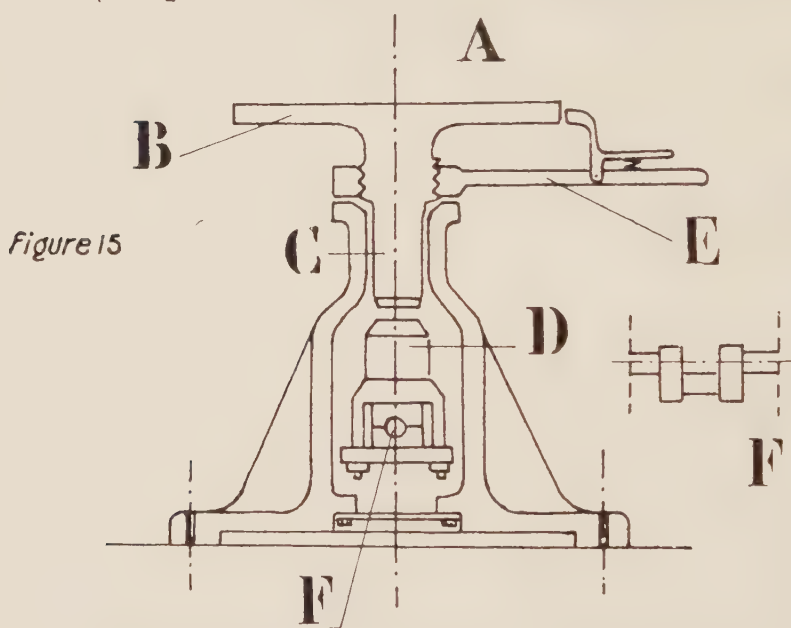
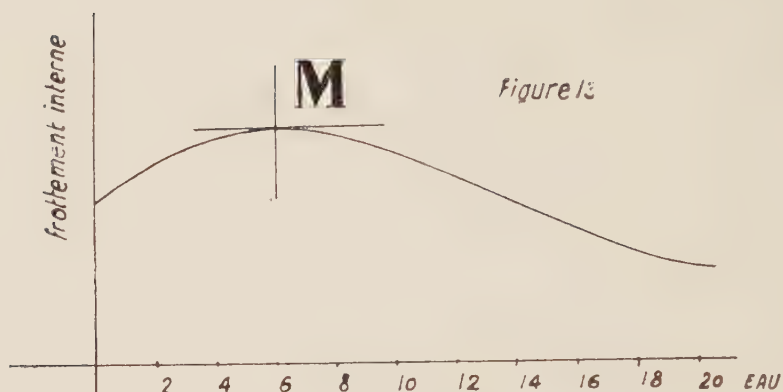
qui le sont pour faire cette mesure sur les ciments à l'aide de l'entonnoir à tamis (c. f. Cahier des Charges, Réception des liants hydrauliques 1919). Puis le mélange est soumis aux vibrations de la table en portant le moule A sur le plateau B. La fréquence des coups est d'environ 1.600 par minute et leur intensité, modifiable par le levier E réglant la course de la tige C avec le piston D. Des crans placés à la périphérie du plateau permettent de repérer la position du levier et donc de garder une intensité de chocs constante pendant toute une série d'essais (fig. 15).

Puis, nous mesurons la nouvelle densité apparente. Ces opérations reprises pour des mixtes additionnés de 2, 4, 6, 18, 20 % d'eau en poids; d'où les résultats du tableau et des courbes de la figure 16.

La densité minimum est réalisée pour les deux sables aux environs de 7 % d'eau. Il peut être intéressant de rapprocher de ces deux courbes celles qui furent obtenues à la même époque par M. MARIANI, au laboratoire du Bâtiment et Travaux Publics.

TABLEAU N° 2

Désignation	Eau %	Poids total	Tare	Densité
Sable A	0	3.357	1.515	1.842
	2	3.205		1.690
	4	3.163		1.648
	6	3.085		1.570
	8	3.105		1.690
	10	3.315		1.800
	12	3.455		1.940
	14	3.405		1.890
	16	3.315		1.800
	18	3.415		1.900
Sable B	0	3.332	1.515	1.817
	2	3.090		1.575
	4	2.959		1.444
	6	2.826		1.311
	8	2.915		1.400
	10	3.067		1.552
	12	3.175		1.660
	14	3.258		1.743
	16	3.312		1.797
	18	3.315		1.800
	20	3.276		1.761



Les essais de M. MARIANI portent sur les sables suivants :

Diamètre des grains

Pourcentage

(en m/m)

0 - 0,2

11 0/0

0,2 - 0,5

7

0,5 - 1

8

1 - 2

8

2 - 5

13

5 - 10

17

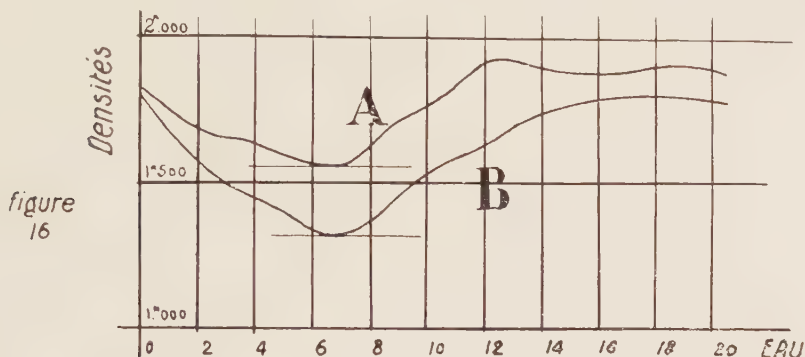
10 - 20

38

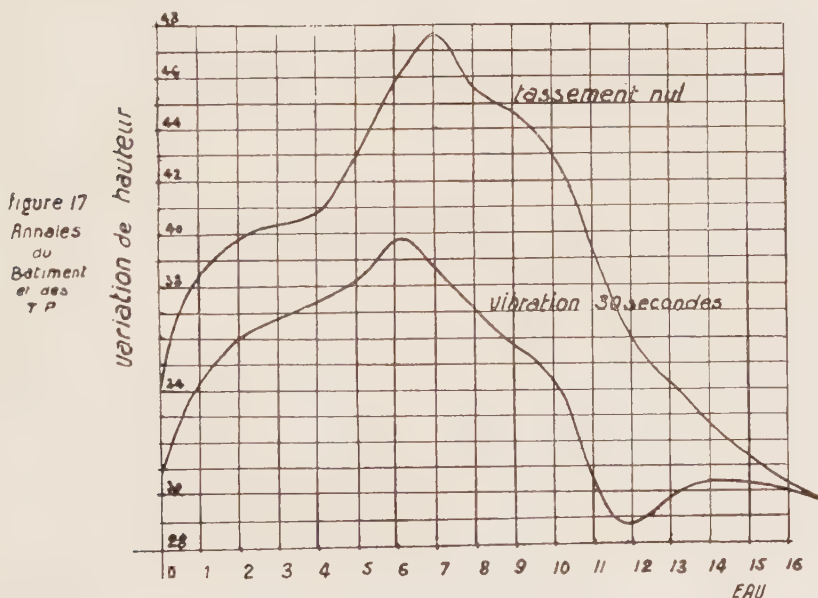
et les courbes ont été établies en faisant également varier le pourcen-

tage d'eau (mesures faites en volumes et non en poids). (Fig. 17.) (Les courbes de M. MARIANI diffèrent légèrement des nôtres pour les fortes teneurs en eau, cela est dû au fait que nous n'avons pas retenu l'eau en excès.)

Mais l'appareil utilisé dans cette première série d'essais n'est pas à l'abri de tout reproche : au lieu d'oscillations sinusoïdales et détermi-



nées **II** ne donne que des chocs dont l'intensité et la fréquence varient selon la pression que l'on exerce sur la table. Elle reproduit à une plus grande échelle le phénomène que nous voulons étudier car il n'y a pas



de liaison mécanique entre la table et la tige C et le piston D, si bien que nous trouvons comme trajectoire de la table la trajectoire complexe que nous avons examinée figure 18.

D'autre part, il n'est pas possible de connaître l'énergie transmise par le vibreur puisque d'une part il n'y a pas une liaison mécanique rigide entre le moteur et la table (transmission par courroie) et que d'autre part nous ne connaissons pas le mouvement de la table.

Nous avons utilisé dans les essais suivants une table vibrante électrique ALTEX dont les caractéristiques sont les suivantes :

Moteur : 220 volts triphasé;

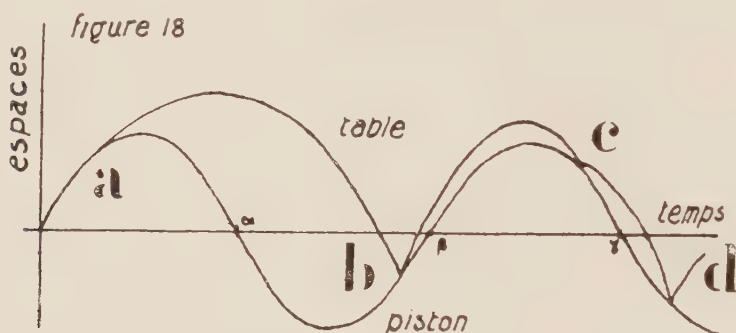
Puissance absorbée : de 80 à 250 watts;

Intensité réglable : 0-1-2-3;

Poids : 12 kilos.

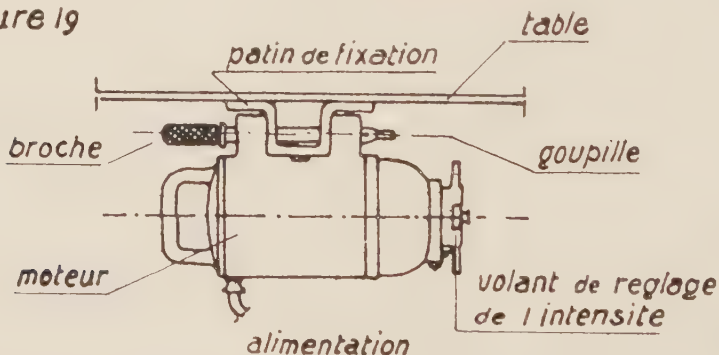
Liaison : Moteur-Table : rigide (fig. 19).

Table : tôle de 3 m/m raidie par croisillon en fer U, et cornières liée par ressorts au bâti.



Avec les précautions expérimentales que nous avons prises, la table ALTEX présente de très faibles variations de la fréquence; un volant placé

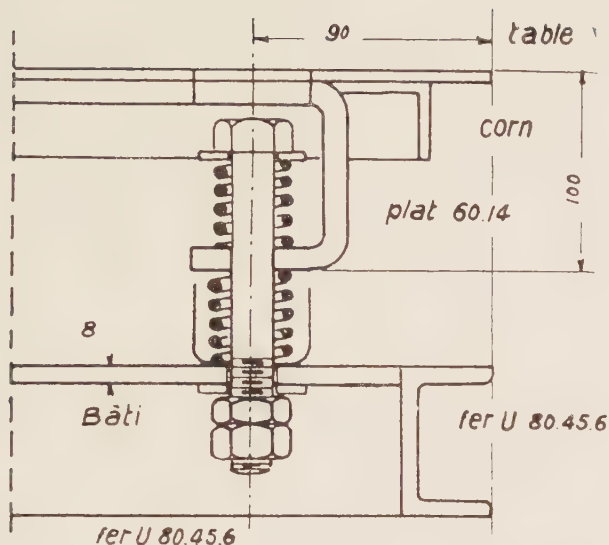
figure 19



au bout du moteur permet de régler l'intensité entre une position minimum et une position maximum

Afin de mesurer la fréquence et l'intensité des vibrations produites, nous avons d'autre part réalisé au laboratoire le procédé suivant : Le principe en est la propriété des miroirs tournants (fig. 22).

figure 20



Un rayon lumineux tombe sur un miroir dont l'un des côtés est fixe et le côté opposé lié rigidement à la table vibrante. Lorsque la table oscille d'une amplitude a le miroir tourne d'un angle α petit si l est la longueur du miroir.

$$\text{tg } \alpha = \frac{a}{l}$$

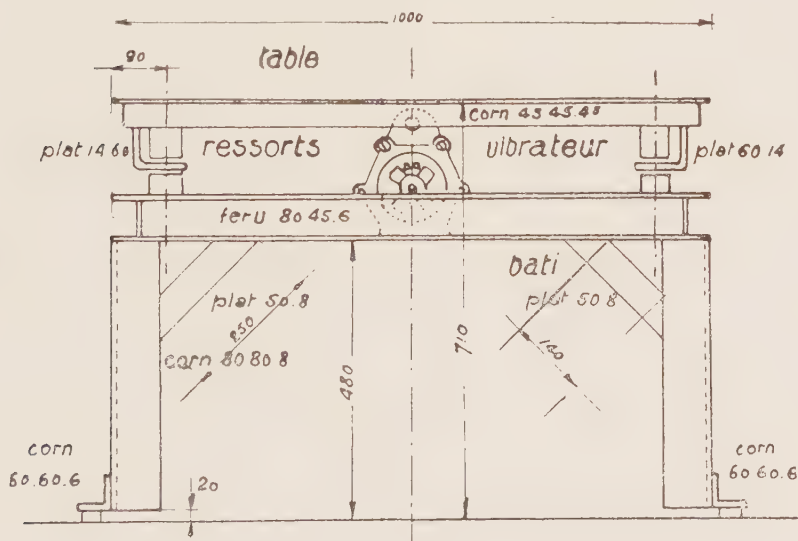


figure 21

echelle 1/10

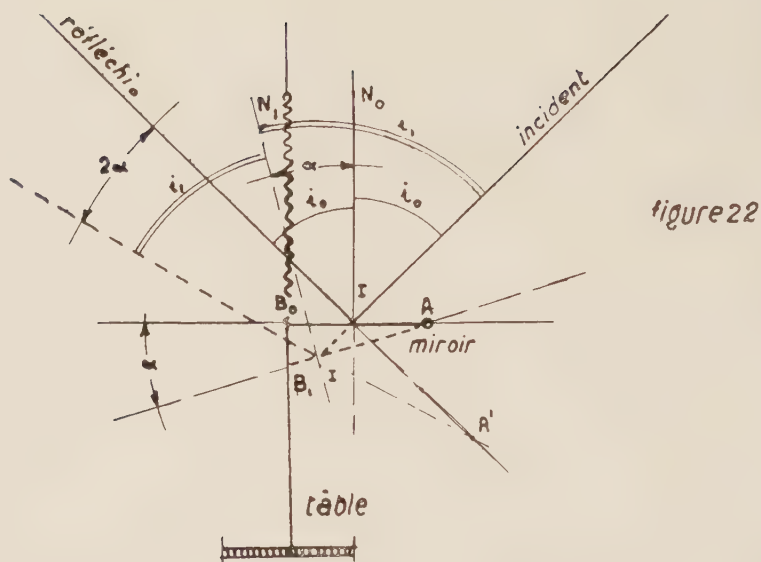


figure 22

Nous pouvons encore amplifier l'effet du miroir en projetant le spot sur un écran éloigné.

Nous avons $\operatorname{tg} \beta^I = \frac{CC^I}{D}$

$\operatorname{tg} \beta^{II} = \frac{CC^{II}}{D}$

d'autre part $2\alpha = \beta^I - \beta^{II}$

donc $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{CC^I - CC^{II}}{D - CC^I \cdot CC^{II}}$ en supposant fixe le point de rencontre des rayons réfléchis A', ce qui est admissible étant donné l'ordre de grandeur de ses déplacements.

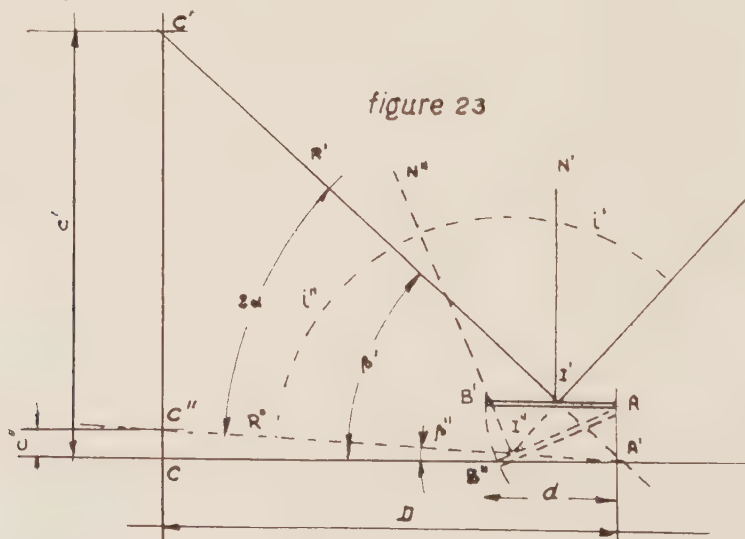


figure 23

D'autre part, si nous plaçons sur les trajectoires des rayons réfléchis un miroir tournant à une vitesse constante connue, nous avons aussi la mesure de la fréquence par un procédé classique.

Le point fixe A est lié rigidement à un gros massif de béton monté sur cales en bois et caoutchouc de façon à empêcher la transmission de vibration par le sol (cf. schéma d'ensemble).

Les essais entrepris avec ce nouveau dispositif sont résumés par les courbes de la figure 25. Le procédé expérimental reste le même, seule la composition du mixte change.

Nous insisterons plus particulièrement sur le mixte n° 10 dont les variations sont montrées par le tableau des résultats suivants :

TABLEAU N° 3

Eau %	Poids bruts		Poids nets		$P_V - P_T$	$\frac{P_T}{P_V - P_T}$
	mixte vibré	mixte tassé	mixte vibré	mixte tassé		
0	3.065	2.915	1.550	1.460	150	0.107
4	3.024	2.815	1.519	1.300	219	0.169
8	3.157	2.847	1.642	1.332	320	0.245
12	3.202	2.892	1.697	1.377	320	0.240
16	3.262	3.022	1.757	1.507	250	0.165
20	3.317	3.092	1.802	1.577	225	0.140

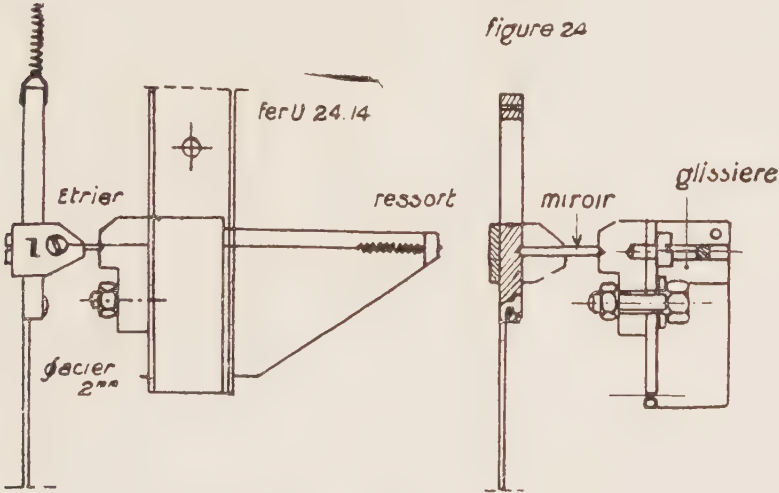
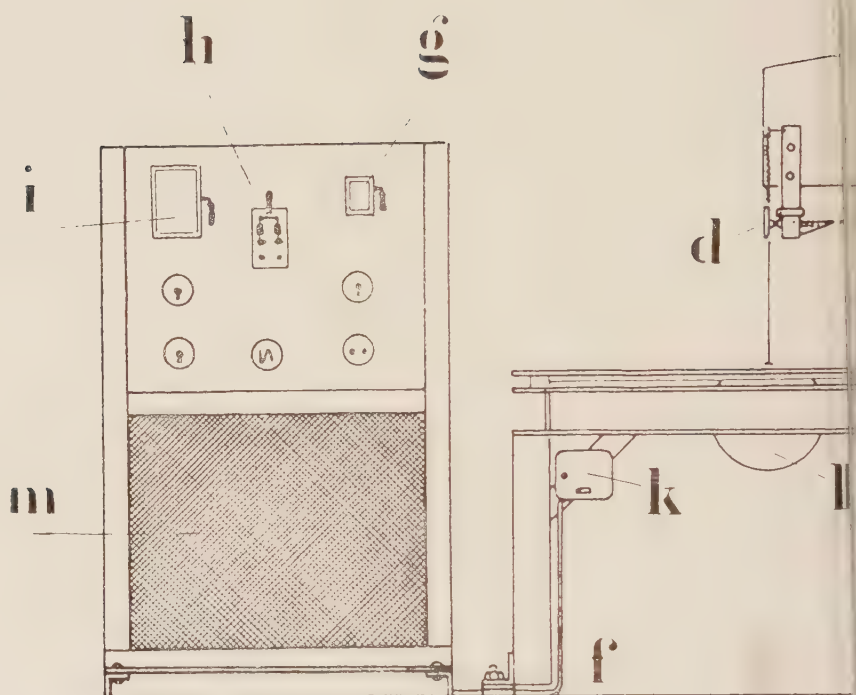


figure 24

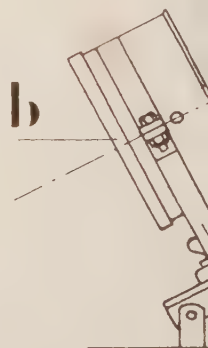
ESSAIS A/B COMPOSITION DES MIXTES

Courbe N° 1	S. N° 6	fins	0.4	gros	0.6
				200 k. ciment par m³ préparé	
N° 2	S. N° 5	fins	0.5	gros	0.5
N° 3	S. N° 0	fins	1.0	gros	0.

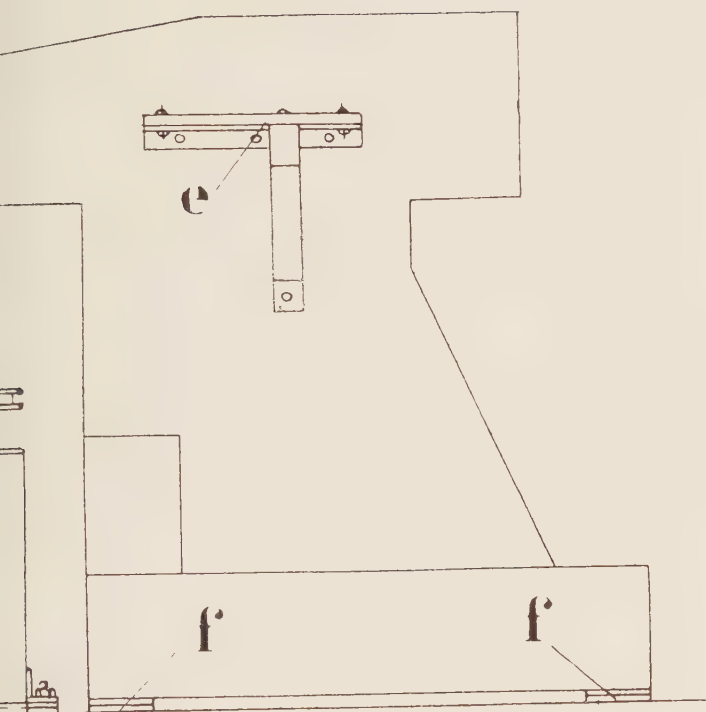
ENSEMBLE DU DISPOSITIF



- d dispositif d'amplification des oscillations
- e support du système optique
- f cales anti-vibrations
- g alimentation lumière
- m transformateur
- h alimentation 6V continu
- i d' force 220~
- k boîte de jonction
- l vibreur ALTEX

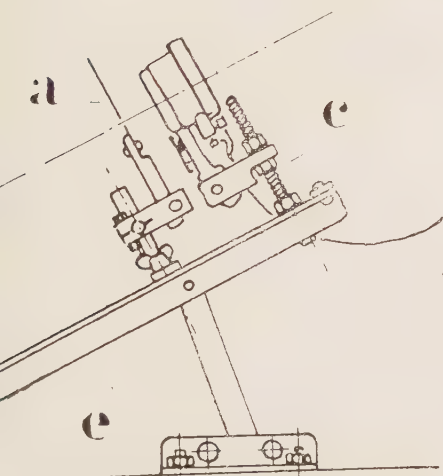


PERIMENTAL



DETAIL

BANC OPTIQUE



- a diaphragme
- b condensateur
- c source lumineuse

INFLUENCE DES ACCELERATIONS

Si nous superposons les courbes réellement obtenues et la courbe grossière théorique que nous avons déduites des premiers résultats, la coïncidence entre le résultat des essais et le résultat prévu est bonne d'autant plus que la courbe théorique est déduite des essais par un raisonnement grossier et qu'il nous est difficile de connaître dans quelle mesure il est nécessaire d'augmenter ou de diminuer les ordonnées; cependant, pour chaque essai, nous avons constaté les mêmes irrégularités de la courbe expérimentale.

Nous pensons avoir le droit d'en conclure que les écarts constatés sont dus à un phénomène dont l'hypothèse d'égalité entre l'énergie transmise par le vibreur et la résistance de frottement interne ne prévoit pas le rôle. Au début de cette étude nous avons expliqué, d'ailleurs, le serrage des grains de ballast en faisant intervenir une autre hypothèse, celle de l'intervention de la cohésion apparente du mélange considérée seule.

Mais il convient encore d'examiner quelques phénomènes secondaires qui se produisent au moment de la vibration :

Lorsqu'on soumet un mixte à la vibration, on constate tout de suite que le serrage des grains est lié à d'autres phénomènes directement connexes, qui mettent en valeur le rôle d'autres facteurs variables.

Si nous prolongeons la durée d'application des impulsions, nous observons, dans certaines conditions, une diminution de la densité que ne laisse pas prévoir l'hypothèse précédente (Cf. courbe 26).

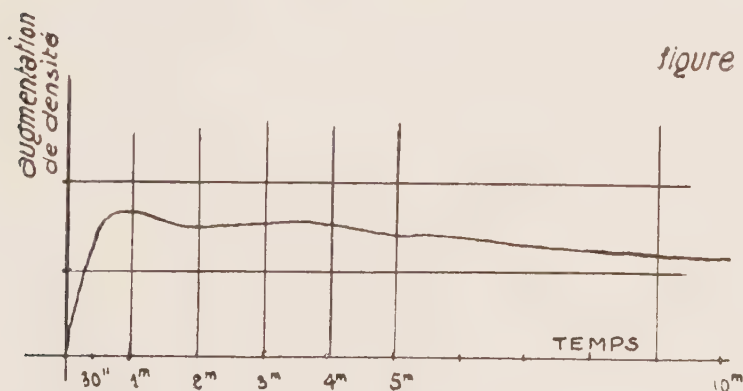


TABLEAU N° 4

ESSAIS Z - 6	N°	Temps	Densité
Sable gros 5/10	1	0	1.400
	2	15"	1.862
moyen 4/10	3	30	2.130
	4	1'	2.245
fin 1/10	5	2'	2.268
	6	3'30"	2.209
Eau 7 0/0	7	5'	2.128
	8	10'	1.977

Energie 2

Par contre, dans un autre essai, nous avons observé les résultats suivants :

TABLEAU N° 5

Essais Z - 4	N°	Temps	Densité
Sable gros 4	1	0	1.500
	2	15"	1.679
	3	30 '	1.750
	4	1'	1.930
	5	2'	2.215
	6	3'30"	1.325
Eau 6 0/0.....	7	5'	1.355
	8	10'	1.390

Energie 0

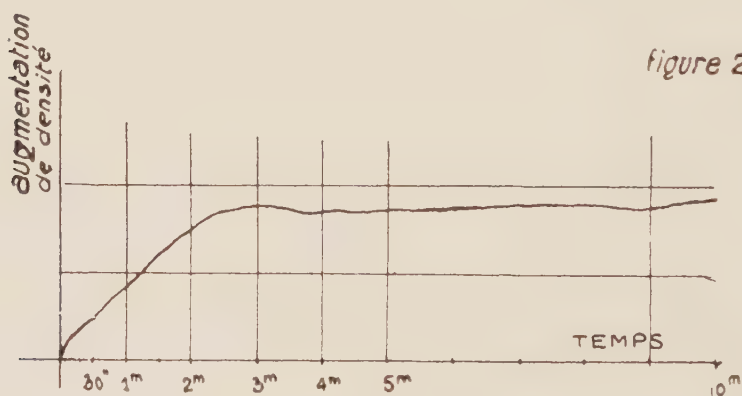


figure 28

Il est probablement nécessaire de joindre à ces observations quantitatives celles que nous avons faites qualitativement sur les mouvements apparents des grains, à la surface des moules pendant la vibration.

Au cours des différents essais les grains se déplaçaient en masses d'un mouvement circulaire chaque fois que le mixte avait une faible cohésion. Chaque fois que le mixte avait une cohésion non homogène,

les ensembles à forte cohésion (grains fins) se rassemblaient en boules animées d'un mouvement différent (en général rotation sur elles-mêmes).

Ces différents phénomènes s'expliquent difficilement si nous considérons seulement une égalité d'énergie reçue ou transmise : Il y aurait, au contraire, à première vue, avantage à vibrer le mixte longtemps pour obtenir une meilleure compacité, puisque nous savons que l'énergie absorbée va en croissant (augmentation de la cohésion et du frottement interne). Nous pouvons considérer cette énergie comme résultante de deux facteurs indépendants : d'une part l'accélération des systèmes, d'autre part la fréquence des oscillations. Il est possible alors de donner une interprétation des phénomènes observés en complétant l'hypothèse d'égalité d'énergie totale par une hypothèse d'égalité d'accélération.

Examinons l'ensemble des forces qui s'exercent sur un grain du mixte en résumant diverses considérations déjà exposées.

Les grains des mixtes sont soumis :

a) Pesanteur;

b) Action capillaire;

c) Dans certains cas : pression atmosphérique;

d) Divers éventuels (pression à la partie supérieure du moule, force centrifuge...) (1).

a) Toutes ces forces sont inégales en valeur et en nature; l'action de la pesanteur est sensiblement constante pour un grain déterminé, puisque les déplacements au sein de la masse sont faibles. Mais elle varie d'une couche de grains à l'autre puisqu'elle comporte non seulement le poids propre des grains, mais encore la résultante des grains placés au-dessus de ces derniers. Elle est proportionnelle à la masse des grains, et la résultante des actions des grains situés au-dessus est nulle à la partie supérieure du mixte et maximum à la partie inférieure.

Dans le cas d'une vibration à basse fréquence cette action est prépondérante, ce qui conduit à exercer une pression sur les pièces vibrées dans ces conditions.

Les pressions que l'on peut exercer sur la couche supérieure agissent comme les résultantes de gravitation; cette action s'ajoute à celle de la pesanteur.

La force centrifuge est proportionnelle à la masse des grains; elle est tantôt positive, tantôt négative, par rapport à la pesanteur.

b) Nous avons vu le mécanisme de l'action capillaire; nous en retiendrons simplement ici qu'elle est variable suivant la proportion d'eau et passe par un maximum pour une proportion E. Elle diminue si le degré de tassement augmente, la quantité d'eau incorporée étant constante puisque les pores deviennent plus petits et que, par conséquent,

(1) Pour mémoire : l'attraction moléculaire négligeable normalement.

(2) FREYSSINET a fait remarquer cette variation de l'étreinte de retrait pour expliquer les anomalies du coefficient de Poisson des bétons.

les ménisques augmentent (2). Par contre, plus le tassement est poussé et plus la proportion E diminue et plus l'étreinte est grande : elle est sensiblement, toute chose égale d'ailleurs, proportionnelle aux surfaces intérieures et devient de plus en plus considérable au fur et à mesure que le mixte contient de plus en plus de grains fins.

Cette action sera intéressante si l'amplitude des vibrations est faible ce qui conduit à utiliser de hautes fréquences pour obtenir la même énergie.

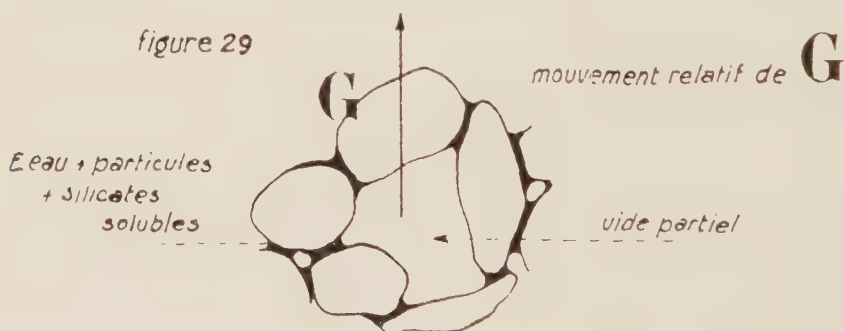
c) Dans le cas de la vibration et pendant celle-là, les grains peuvent, en outre, être soumis à un effet de ventouse (fig. 29).

Nous avons vu que pour serrer les grains du mixte, il fallait obtenir des mouvements relatifs de translation et de rotation au cours de ces divers mouvements et si les grains G ne sont pas projetés trop violemment et si les films liquides pratiquement imperméables à l'air pour un temps très court peuvent subsister et assurer l'étanchéité, il se produit à l'emplacement primitif du grain un vide partiel qui a pour effet de créer une cohésion supplémentaire.

Au moment où nous appliquons une vibration à ce mélange, il convient d'ajouter aux forces précédentes une impulsion déterminée par les caractéristiques de l'appareil vibreur.

Nous avons vu (page 23) que la condition nécessaire pour obtenir des mouvements relatifs de différents grains était une relation entre la cohésion et la force tangentielle (1) $F > \phi P$ où ϕ est une fonction croissante de la compacité.

On essaie souvent de réduire le volume de vide en exerçant une pression à la partie supérieure, mais dans la relation (1) l'équilibre ne peut être modifié que par un changement de répartition entre F et P. Ce changement ne peut être provoqué que par une modification de structure du mixte. Au début le tassement est facilement obtenu en raison de la faible compacité et de l'instabilité des équilibres internes; les grains ayant très peu de points communs peuvent souvent basculer; il



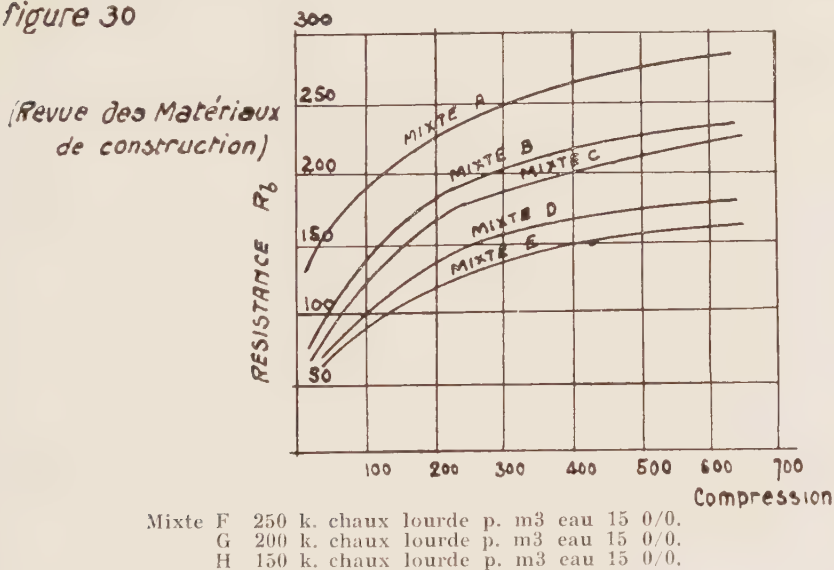
Mixte R	250 k. ciment	p. m3	eau	8 à 10	0/0.
B	200 k. ciment	p. m3	eau	8 à 10	0/0.
C	100 k. ciment	p. m3	eau	8 à 10	0/0.
D	250 k. chaux	lourde	eau	10 à 15	0/0.
E	200 k. chaux	lourde	eau	10 à 15	0/0.

n'en est plus de même à la fin de l'opération et il devient nécessaire d'obtenir des déformations ou des ruptures des grains (figure 30-31). On a un phénomène discontinu. La compacité sera fonction des qualités mécaniques du ballast.

D'ailleurs, il n'est pas toujours possible d'obtenir une majoration importante de la compacité car, en dehors du problème déjà vu de la granulométrie optimum, ce résultat est contrarié par la présence de l'eau en excès et de l'air occlus : quand le volume des vides du mixte devient égal au volume de l'eau, la pression se transmet hydrostatiquement dans toutes les directions.

Par contre, si nous soumettons le mixte à la vibration, il devient théoriquement possible d'obtenir de meilleurs résultats, puisque la répartition entre F et P sera variable. Les deux forces ϕ et P vont varier en sens contraire pour les raisons que nous avons déjà vues, si bien que nous observerons un phénomène double : d'une part (1) sera réalisé par diminution du frottement et que, d'autre part, elle le sera par augmentation de la cohésion (1).

figure 30



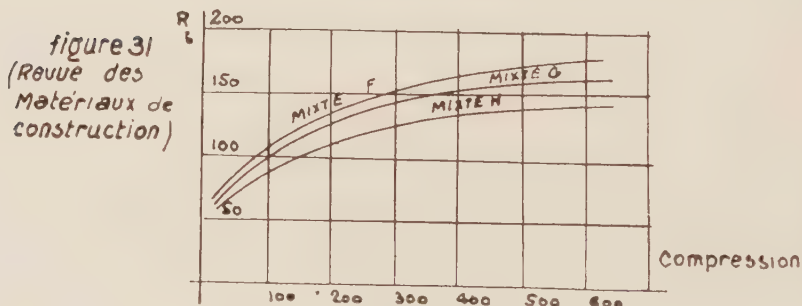
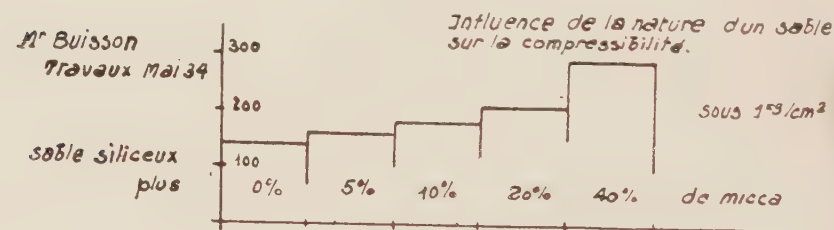
Pour que le tassement ait lieu, nous l'avons déjà vu, la cohésion est nécessaire et nous pouvons en particulier regarder la surface vibrante comme une surface interne du mixte et soumise à des mêmes forces de cohésion. L'adhérence des grains entre eux et des grains inférieurs à la surface vibrante rend possible le tassement : on conçoit que plus cette action est grande, plus le vibreur est efficace.

(1) La cohésion est ici la somme de la cohésion vraie, de la cohésion apparente et aussi de la composante suivant la direction des cohésions apparentes et vraies de l'impulsion du vibreur.

Les grains animés d'une vitesse v transmettent des impulsions aux grains voisins dont les vitesses acquises seront inversement proportionnelles à leur masse. La mécanique nous fait prévoir qu'après le choc les premiers grains auront tendance à revenir vers leurs positions d'origine selon un mouvement dont la fréquence est inversement proportionnelle à leur masse.

Si la cohésion est faible par rapport à l'impulsion transmise par la surface vibrante, les grains seront projetés au hasard. L'effet de la vibration conduit les grains d'une disposition comportant des vides et de faibles surfaces de contact vers une nouvelle disposition comportant une proportion plus faible de vides et des surfaces de contact plus grandes; cette dernière position est donc plus stable; et il lui correspond une cohésion et un frottement interne P_B et ϕ_B . Si l'impulsion alors transmise correspond à l'inégalité $F_B < P_B \phi_B$ les grains ne pourront plus se déplacer; si, au contraire $F_B > P_B \phi_B$ le mouvement des grains ne sera pas arrêté. On voit donc qu'il doit exister une relation entre l'impulsion et la fonction cohésion — frottement — indice des vides du mixte et que cette relation doit aboutir à l'inégalité $F_n < P_n \phi_n$.

Dans ces conditions, un grain se trouve, au cours du mouvement, libéré d'une partie de ses contraintes et peut prendre une seconde posi-



miste F	250	kg	chaux	lourde	pm ³	eau	15%
G	200	"	"	"	"	"	"
H	150	"	"	"	"	"	"

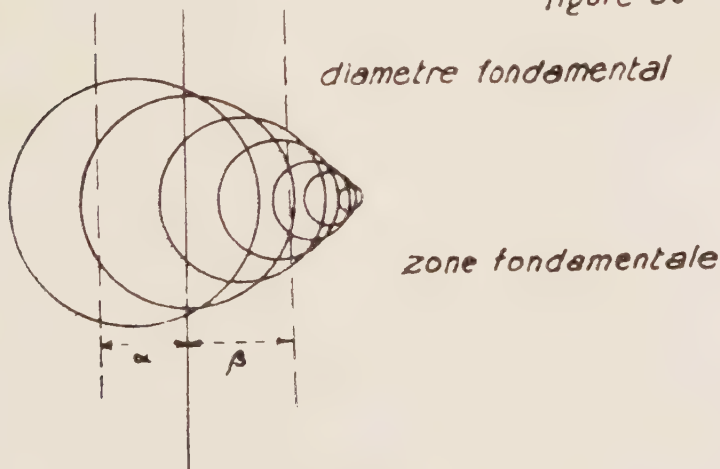
tion; si la résistance de frottement et la cohésion sont supérieures à la force tendant à déplacer les grains à nouveau, il est immobilisé par rapport aux grains voisins et les impulsions leur sont alors transmises avec plus d'intensité.

Si la vibration est appliquée pendant un temps très court, le serrage sera faible, mais aucune des organisations de la masse ne pourra se produire; par contre, si le temps est long et si $F_n > P_n \Phi_n$ l'équilibre ne sera jamais réalisé. Il se produit alors le phénomène dont nous avons parlé au début de ces conclusions. La quantité de mouvement d'un grain étant proportionnelle à la masse comme, d'autre part, les actions qui s'opposent à son déplacement sont surtout proportionnelles à sa surface, il s'ensuit des mouvements différents pour les différents grains et ces variations seront d'autant plus grandes que la cohésion sera plus faible. Il en résulte une conclusion importante que vérifie l'expérience : si nous appelons masse fondamentale la masse d'un grain dont la fréquence propre est la même que celle de la surface vibrante, la cohésion transforme cette masse en une zone fondamentale.

Cette zone n'est pas symétrique, car la cohésion est plus forte du côté des grains fins. Il en résulte que *dans la gamme étendue des diamètres des différents grains : ciment, sable, cailloux, la vibration serre une zone déterminée dont la masse fondamentale est fonction de la fréquence du vibreur et dont l'étendue est fonction des caractéristiques physiques du mixte.*

D'autre part, il faut aussi considérer la répartition du travail absorbé par les forces résistantes : nous avons vu la variation de l'intensité de ces forces, il faut encore considérer la variation des déplacements de leur point d'application : plus le serrage est avancé et plus les déplace-

figure 33



ments (quand les impulsions sont bien proportionnées) deviennent faibles; il en résulte que si nous appliquons à un mixte une énergie constante, il existe un moment à partir duquel le travail absorbé devient faible devant l'énergie fournie et l'excès d'énergie produit des mouvements désordonnés dans la masse : plus celui-ci sera grand et plus les mouvements relatifs dont nous avons parlé plus haut seront importants.

Une vérification de ces conclusions est donnée par la courbe indiquée par M. L'Hermite dans *Le Constructeur de Ciment Armé* de février 1935.

L'énergie III est inférieure à l'énergie II, celle-ci étant à son tour inférieure à l'énergie I.

Il y a donc lieu de considérer à la fois la somme totale d'énergies transmises, la valeur des accélérations et la fréquence. Nous en concluons encore que pour chasser l'air que contient le mixte il faudra une certaine valeur de l'accélération afin de provoquer d'abord une dislocation de la masse permettant aux bulles de se frayer un chemin par la dissociation des films imperméables.

Nous pouvons, en dernier lieu, établir la liste des caractéristiques dont les valeurs conditionnent l'efficacité de la vibration :

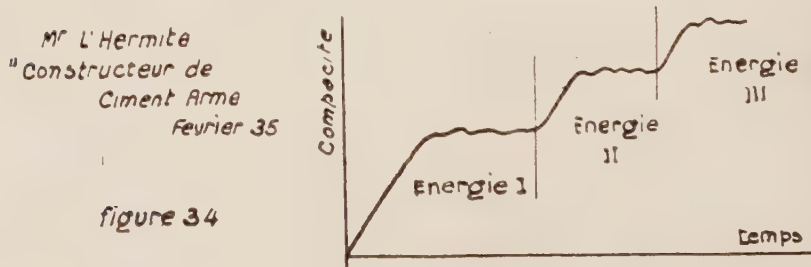
Pour le mixte Ballast-Ciment : Masse totale; densité absolue; nature des grains; forme des grains; masse des grains (composition granulométrique).

Pour le liquide : Densité; viscosité; proportion. (Les éléments qui conditionnent le frottement interne et la cohésion capillaire ainsi que les autres forces de cohésion.)

Pour le vibreur : Accélération maximum; fréquence; masse vibrante.

Enfin interviennent les éléments relatifs aux moules ou aux coffrages, mais nous avons laissé de côté dans cette étude toute cette partie importante du problème de la vibration.

Dans les conditions optima il ne s'agit plus de chocs s'exerçant dans toutes les directions et de grands déplacements, mais, au contraire, d'oscillations de très faible amplitude entre deux points limites, l'élasticité



des grains intervenant de plus en plus, de sorte que la « transmission du mouvement vibratoire au sein du mixte tend à se rapprocher du processus de vibration d'un corps élastique homogène ».

Dans la seconde partie nous allons étudier synthétiquement, en fonction de ces résultats, quelques essais sur les mortiers et bétons et voir comment l'ensemble des hypothèses permet d'expliquer les observations provenant de chantiers d'exécution pratique, puis nous examinerons quelques nouveaux essais destinés à compléter ces hypothèses.



ETUDE DES MELANGES TERNAIRES

Au début des essais entrepris pour étudier le béton vibré, nous avons été frappés par la grande irrégularité des résultats de mesures faites pour déterminer les coefficients caractéristiques des bétons : la résistance à l'écrasement R_{τ} varie souvent pour un même béton de 1 à 4 (1); le module d'YOUNG, qui dépend en outre des contraintes préalables et des charges actuelles n'est lui-même pas assez connu pour permettre des déterminations précises du coefficient m d'équivalence.

Nous pensions alors qu'il serait intéressant d'obtenir un matériau constant, qui reste comparable à lui-même et pour lequel ces coefficients seraient sinon constants, du moins liés par une fonction connue du temps ou des charges imposées et que ce résultat pourrait être obtenu par l'arrangement parfait des divers éléments en vibrant convenablement le béton.

Malheureusement, ni la composition granulométrique des ballasts ni leur résistance mécanique propre ne peuvent laisser espérer ces résultats (2).

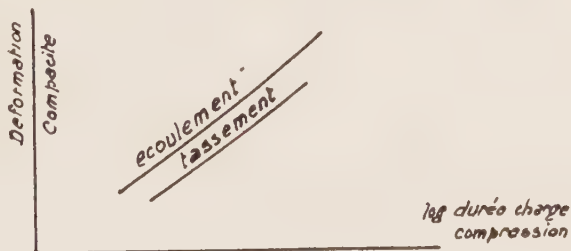
(1) Essai entrepris par le Conseil National des Recherches Italien. Essai sur les sables normaux du lit du Pô et sur un autre sable (T de L). Echantillons bien homogènes distribués à 5 laboratoires. Malgré les conditions très bonnes de comparabilité, le professeur GIANNELLI donne les écarts en p. 100 suivants :

Ciment	Traction	Sable du Pô	T. de L.	Compression	Sable du Pô	T. de L.
A		10,5	13,6		25,8	19,8
M		10,8	17,0		28,3	15,6
C		15,8	18,3		14,3	11,5

(2) Il est possible cependant de tirer de la vibration un avantage scientifique dans cet ordre d'idées, non pas en mesurant la résistance de rupture, mais en mesurant la déformation plastique et élastique d'un béton. En effet, (M. PARIS) si l'élasticité d'un béton paraît être la conséquence de l'élasticité des composants (1) en vertu de la loi des grands nombres, par contre l'écoulement plastique semble dépendre surtout de la disposition, de la forme et de la plasticité du ballast : il résulte des déformations plastiques et des mouvements relatifs des grains du ballast.

figure 36

M^r Mariani
Entreprise française



(1) Il n'y a pas théoriquement de déformation élastique (monocristaux).

La variation de la résistance à l'écrasement est une caractéristique des pierres naturelles (1); des essais que nous avons faits sur chantier nous ont donné, d'autre part, les compositions granulométriques qui vont suivre et mettent en évidence de très grandes variations (tableau 5).

TABLEAU 5 (extraits)

Eléments de la composition granulométrique du tout-venant.

TABLEAU N° 6

Poids au litre	Sable	Gravillon		Granulomètre du sable			
	$d > 1 \frac{c}{m}$	$d > 6 \frac{m}{m}$	$d < 6 \frac{m}{m}$	$d > 3 \frac{m}{m}$	$d > 1 \frac{m}{m}$	$d > 0,5 \frac{m}{m}$	$d > 0,5 \frac{m}{m}$
1.888	3.560	1.520	13.700	1.740	2.260	5.400	4.280
1.817	0.800	1.400	15.870	1.960	3.160	7.500	3.240
1.863	0.460	3.540	14.600	2.560	3.030	3.680	5.300
1.927	2.600	3.300	13.350	4.000	2.700	4.040	2.600
1.881	3.000	2.000	13.760	2.100	2.800	4.200	4.640
1.877	3.200	1.960	13.600	2.000	2.630	4.260	4.680
1.900	3.400	1.800	13.760	1.980	1.900	2.140	7.720

Les essais mécaniques exécutés sur les bétons vibrés et tassés à la main ont cependant donné des résultats intéressants qui permettent de vérifier l'ensemble de l'hypothèse et d'expliquer les résultats de la pratique.

Le critérium adopté dans ces essais sur des mixtes ternaires : bal-last-ciment-eau, est la résistance à l'écrasement. Nous avons vu qu'il existe une relation entre la compacité et sa résistance R_T et que la résistance croît d'autant plus que la compacité est plus grande : nous sommes donc assurés, dans ces conditions, d'obtenir, en faisant varier un facteur quelconque de la compacité une courbe de la résistance qui aura la même allure, ou mieux, dont les ordonnées seront exagérées : le phénomène étudié sera plus visible.

Nous avons essayé, à un moment, de faire une mesure directe de la compacité de différents échantillons de béton. Mais il était nécessaire alors de s'appuyer sur les méthodes normales d'essai des matériaux afin d'obtenir des résultats qui puissent être comparés avec ceux trouvés dans d'autres recherches. Les cahiers des charges définissent la com-

(1) M. MAGNEL (Cours de Stabilité des Constructions) (Van RYSSSELBERGHE, Gand) caractérise les pierres naturelles comme suit :

a) leur résistance à la pression est beaucoup plus élevée que celle à la traction;

b) elles n'obéissent pas rigoureusement à la loi de HOOKE;

c) elles présentent de grosses différences de résistance d'un échantillon à l'autre d'une même sorte de pierre.

pacité comme l'inverse de la porosité; celle-ci, à son tour, se mesure en faisant la différence entre le poids de l'éprouvette sèche et celui de l'éprouvette imbibée d'eau dans certaines conditions; cette méthode suppose, sans que rien ne permette d'en être sûr, que ces conditions remplies, l'eau occupe bien tout le volume des pores de l'échantillon.

D'autre part, M. MARIANI a fait à la même époque des essais au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux publics; il a mesuré le volume occupé par un poids constant d'un mixte eau-sable-poudre minérale inerte (de même poids spécifique que le ciment et de granulométrie très peu différente de celle de ce liant). Mais les mesures de volume sont toujours difficiles.

Ce critérium choisi, il restait à définir les dimensions des cubes dont la résistance à l'écrasement allait être mesurée.

M. TREVES, Ingénieur des Arts et Manufactures à la Compagnie Parisienne d'air comprimé, nous avait conseillé de faire nos essais sur de très gros cubes d'au moins 50 à 75 cm. de côté, placés dans des coffrages en bois, afin de se rapprocher des conditions de la pratique. Dans cette masse nous aurions ensuite découpé des cubes plus petits destinés aux essais mécaniques. Cette façon de faire est très coûteuse et nécessite un matériel important, mais surtout elle est très dangereuse, car elle met en jeu un plus grand nombre de facteurs mal connus de la vibration (réaction des coffrages, par exemple cf. p. 53) et pose le problème de la transmission parfaite des vibrations à travers une masse importante.

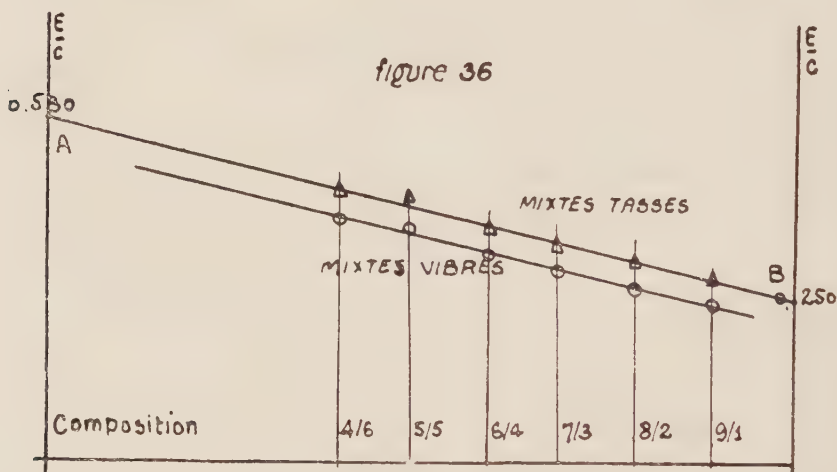
D'autre part, si la compacité de ces différents cubes varie, en fonction d'un facteur quelconque, le rapport $\frac{\text{masse vibrée}}{\text{masse vibrante}}$ qui fixe la fréquence et l'intensité des vibrations va varier de façon très notable, la masse en rotation dans le vibreur ALTEX étant d'environ 5 kg. et la variation de poids d'un cube de 50×50 cm. étant de l'ordre de 75 kilos, nous ne pouvons pas dire que nous vibrons à une fréquence déterminée. On voit ici l'avantage de la méthode réalisée par M. MARIANI : le poids du mixte essayé étant constant, la fréquence reste rigoureusement fixe. Nous avons utilisé des cubes de 5 et 10 cm. de côté qui nous donnent des variations insignifiantes de fréquence.

Enfin, on nous avait conseillé d'utiliser des pervibrateurs, c'est-à-dire des vibreurs noyés dans la masse du béton. En dehors du fait qu'il est impossible d'en introduire dans des cubes aussi petits, nous avons considéré que le mécanisme de la pervibration est un peu plus compliqué que celui de la vibration, en raison des réactions des grains les uns sur les autres et de l'indétermination de la direction de la force de serrage, et que l'usage d'une table vibrante nous plaçait dans des conditions favorables aux raisonnements mathématiques simples du début.

Le ballast est constitué dans cette série de sable naturel de Seine composé, selon les principes de M. FERRET, exclusivement de grains gros et fins de sable, dans les proportions croissantes 1/9, 2/8, etc... jusqu'à

9/1. Le mixte binaire est défini par la notation Béton x/y qui indique :
 x quantité en dixième d'unités de gros grains
 y quantité en dixième d'unités de grains fins

La détermination de l'eau de gâchage pose un problème un peu délicat : on sait que le rapport $\frac{\text{eau}}{\text{ciment}}$ influe sur la résistance à l'écrasement, il est donc nécessaire de garder ce facteur constant dans des essais qui ont précisément comme critérium cette résistance. Mais d'un autre côté nous avons pensé qu'il existe dans les mélanges riches en grains fins une somme de surface des grains du ballast supérieure à celle qui existe dans les mélanges riches en gros grains; comme, d'autre part, il paraît vraisemblable que l'eau constitue autour de chaque grain un



film que l'on peut admettre d'épaisseur constante et, par conséquent, nécessitant au total une quantité d'eau proportionnelle aux surfaces, nous avons pensé utiliser la courbe suivante, donnant la variation du rapport $\frac{E}{C}$ en fonction de la composition granulométrique du mélange.

Pour construire cette courbe, nous avons utilisé des chiffres donnés par M. CANDLOT (1) et nous les avons légèrement modifiés en nous basant sur l'aspect des mortiers gâchés dans ces conditions. La courbe de variation de la somme des surfaces est une droite, car nous pouvons admettre que la surface totale des grains d'une catégorie est proportionnelle au nombre ou encore au poids de ces grains. Ce qui est pratiquement vrai en raison du grand nombre de grains considérés. Les chiffres trouvés par une voie purement expérimentale lors d'une première série d'essais se sont placés d'ailleurs sensiblement sur la droite A. B.

(1) Cité par M. DEBES. *Cours de Maçonnerie béton, béton armé*. Eyrolles, éditeur.

Enfin nous avons, pour le mélange qui devait être vibré, facilité l'observation des résultats en prenant un rapport $\frac{E}{C}$ légèrement inférieur, donné par une parallèle à la droite précédente.

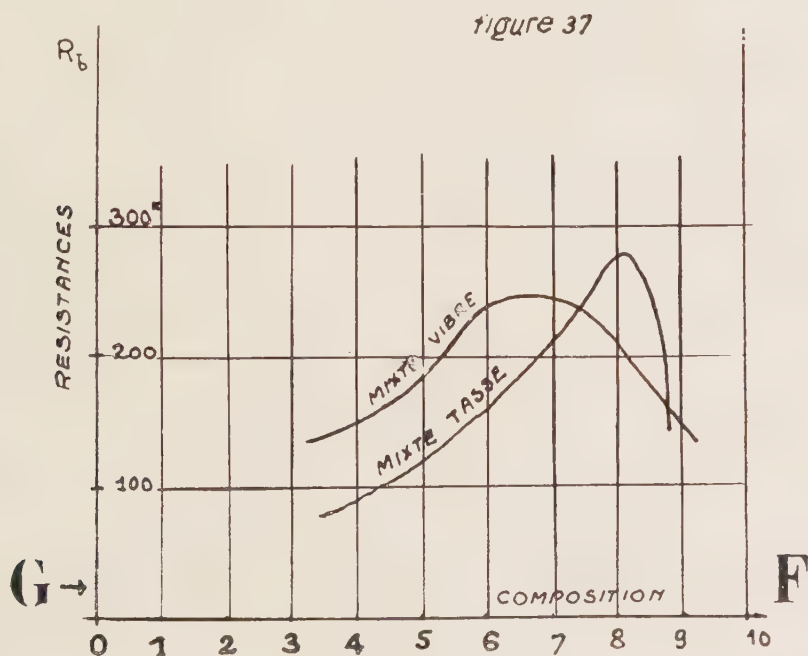
Le ciment utilisé est un Portland artificiel ordinaire. Le dosage fixé au début à environ 350 kg. de mortier en œuvre, a été ramené, afin de rendre plus sensibles les phénomènes propres du serrage, à environ 250 kg. par m³ de mortier en œuvre (cf. d'essais C page 50).

Les essais de résistance à la compression ont pour but d'étudier la variation à fréquence et intensité constante de la résistance à l'écrasement en fonction de la composition du sable et de voir le gain donné par la variation à fréquence et intensité constante de la résistance à l'écrasement donnent les résultats suivants :

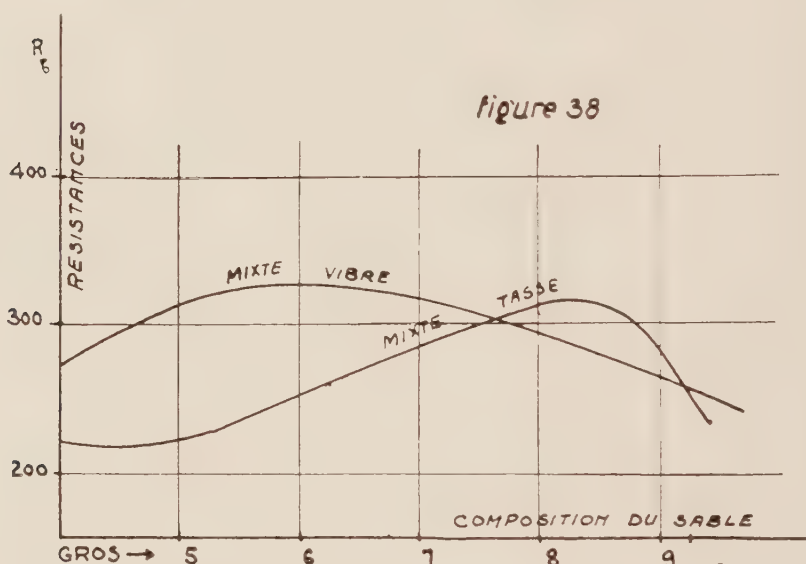
TABLEAU N° 7

ESSAIS B			ESSAIS B'		
N° mixte	7 jours	28 jours	N° mixte	7 jours	23 jours
6	335 - 256	459 - 398	3	180 - 95	287 - 182
5	316 - 220	488 - 358	4	114 - 63 ^s	238 - 147
4	» - »	404 - 374	5	176 - 117 ^s	310 - 211
7	308 - 286	420 - 388	6	237 - 165	330 - 227
8	303 - 306	400 - 390	7	241 - 205	335 - 287
			8	206 - 273	322 - 362
			9	141 - 0	» - »

et les courbes suivantes :



Ces résultats sont d'accord avec les hypothèses vues précédemment. On s'explique très bien que les résultats de la vibration soient meilleurs dans la zone riche en grains fins puisque dans cette zone la cohésion est plus forte en raison de la contrainte de retrait due à des effets capillaires. Ils mettent aussi en évidence ce fait expérimental connu des praticiens : à savoir que les gains de résistance dus à la vibration ne sont pas constants. *Il existe donc, pour un appareil vibreur donné, une composition granulométrique critique dans le cas d'un sable binaire roulé. Pour une proportion plus riche en grains fins, la vibration augmente la compacité, pour une proportion plus riche en gros éléments la vibration, au contraire, diminue la compacité.* Cette conclusion, étant valable dans la zone du point critique qui est, par ailleurs, la seule qui soit



intéressante pratiquement, puisqu'elle contient le maximum de résistance du mortier vibré et le maximum de résistance du béton normalement tassé.

Si nous nous plaçons encore au point de vue pratique, nous pouvons remarquer que le maximum « vibré » est déplacé vers la gauche, c'est-à-dire précisément vers le mélange utilisé ordinairement sur le chantier. C'est ce qui explique pourquoi la vibration a tout de suite semblé avantageuse : aux fréquences et avec les intensités ordinaires, les sables donnent un maximum de gain de résistance. Nous verrons ultérieurement (cf. p. 49) dans quelle mesure ces résultats obtenus avec des mortiers peuvent être étendus aux bétons composés d'éléments plus gros.

Nous voyons encore que la courbe des mortiers vibrés est sensiblement plus plate que celle des mortiers tassés. Ces écarts de granulomé-

métrie sont beaucoup moins importants pour la résistance dans le cas des mortiers vibrés : nous constatons un nivellement qui nous permet d'être sûrs, quelle que soit la composition du sable, de ne pas avoir une trop grande baisse de la résistance, mais il est possible que la composition utilisée donne, par simple tassement à la main, une résistance supérieure. Si nous supposons avoir choisi la composition 8/2 (figure 37), nous avons une très forte résistance en mettant le mortier en place à la main. Mais si la composition du sable vient à varier, et nous avons vu combien il est difficile d'être certain d'avoir une composition exacte, nous risquons d'avoir la composition 9/1 qui donne une résistance R_T de 0 (7 jours; par contre la mise en place par vibration assure une résistance d'au moins 150 k., soit une variation de 25 0/0 environ.

Cela se comprend si l'on considère que le frottement interne diminue en même temps qu'augmente la cohésion (en fonction de la composition granulométrique).

Dans une autre série d'essais, nous avons étudié l'influence de la vibration sur les ciments gâchés en pâte pure; nous pouvons voir en même temps dans quelle mesure il est possible de diminuer le rapport $\frac{E}{C}$.

Les essais de cette série sont faits sur des pâtes gâchées conformément au cahier des charges (sur un marbre — pendant 5 minutes, etc.).

Les constatations faites montrent que la vibration est sans action sur le ciment, si bien que la résistance des pâtes vibrées est sensiblement égale à celle des pâtes tassées conformément au cahier des charges et que, d'autre part, nous retrouvons les courbes classiques de résistance en fonction du rapport $\frac{E}{C}$.

Cependant, pour les faibles dosages en eau, les deux courbes s'écartent et il y a décalage entre la résistance maximum de la courbe « vibrées » et celle de la courbe tassée.

On voit donc le double avantage important de la vibration dans le cas d'un ciment :

1° le rapport $\frac{E}{C}$ peut être diminué puisque la vibration permet de mettre en place un mortier plus sec;

2° à condition d'opérer avec un mixte très sec la résistance propre du ciment augmente légèrement (tableau et courbe de la figure 39).

On voit par ces essais que la notion de diamètre fondamental n'est pas la plus importante puisque la vibration agit sur des sables de diamètre relativement importants et met le ciment dont les grains ont un diamètre maximum de 0,36 m/m, mais dont la cohésion est très élevée l'action sur les grains de ciment étant cependant produite vraisemblablement par un mécanisme différent.

C'est pourquoi, et d'autres essais nous ont confirmé ce résultat, l'efficacité de la vibration dépend plus de la valeur de la force de cohésion que des dimensions propres des grains dans les limites des bétons ordinaires, si bien que seul le sable qui entre dans la composition de ces

bétons influe principalement sur le résultat final : la fonction (Matériau-Vibrateur) peut donc être simplifiée et il suffit d'étudier soigneusement la granulométrie du sable en fonction du procédé de vibration envisagé. D'ailleurs les grains fins des sables étant les plus importants, on voit que l'étude se simplifie encore et revient pratiquement à un dosage des éléments fins (de 0 à 0,5 m/m). Ce dosage est un des plus faciles à corriger en utilisant des sables analogues à ceux de Fontainebleau ou de farines fossiles (Kieselguhr) (1); l'usage de ces sables peut encore s'ajouter aux avantages pécuniaires que présente la vibration en permettant une diminution du dosage en ciment.

TABLEAU N° 8

ESSAIS C.

Série	Ciment Kg.	EAU		E C	DATE Fabrication	No	Age	DATE Essais	R 9 vibré	R 10 non vibré	Moyenne	
		o/o	Poids								9	10
1	0.6	26		0.26	25-1	1	7 j.	1 ^{er} fév.	550	565		
						3	»	»	555	»		
						4	»	»	555	535	549	563
						5	»	»	535	615		
						7	14 j.	8 fév.	665	700		
						8	»	»	665	690	660	700
						9	»	»	670	711		
						28	14 j.	10 fév.	615	624		
						29	»	»	617	622	618	620
2	0.6	30		0.30	27-1	30	»	»	622	614		
						16	14 j.	»	635	480		
						17	»	»	635	480	635	490
3	0.6	24		0.24	17-2	18	»	»	635	510		
						a	14 j.	»	570	320		
						b	»	»	572	319	570	328
4	0.6	22		0.22	17-2	c	»	»	568	345		
						d	14 j.	»	670	675		
						e	»	»	670	673	670	580
5	0.6	28		0.28	19-2	f	»	»	670	692		

(1) On sait que les farines fossiles (variété terreuse, biogène de l'opale) ou Terre d'Infusoires ou Raudanite, Ceynatite, Tellurine, Tripoli, etc., sont une accumulation de frustules de diatomées. Elles sont formées de silice amorphe sans action sur la lumière polarisée et sans raie aux rayons X.

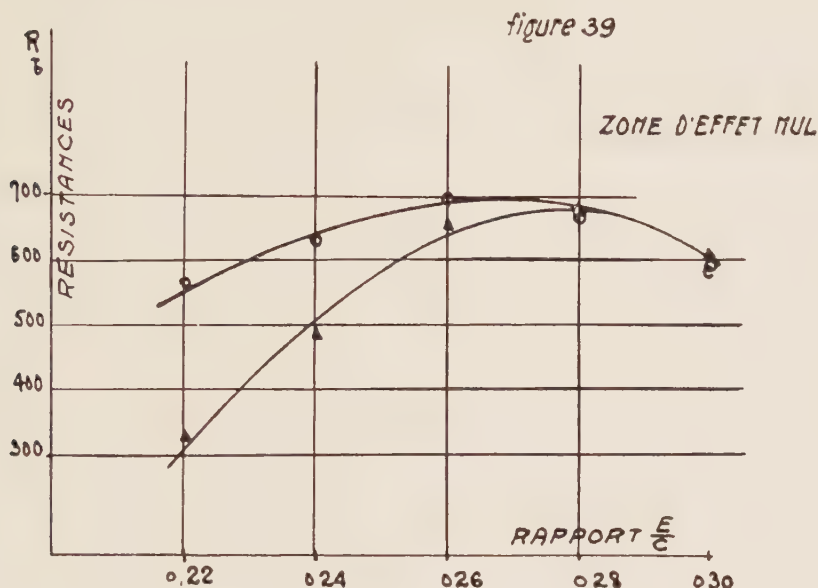
Analyse (gisement d'Aixillan, France) :

Humidité.	2,4
Perte de feu.	1
Silice.	91,6
Alumine.	1,5
Oxyde de fer.	2,2
Chaux.	0,2
Magnésie.	0,3
Divers.	0,8

La silice qu'elles contiennent était fixée par les diatomées dans l'eau de mer. Elles agissent, en outre, dans les bétons, vraisemblablement par combinaison avec la chaux.

On peut, d'autre part, diminuer la teneur en eau en éliminant la laitance (eau + produits d'Hydrolyse des ciments) qui apparaît à la surface au moment de la vibration.

Si nous nous reportons à la figure 1, nous voyons enfin que le gain de résistance pour une augmentation de compacité donnée est d'autant plus grand que le dosage est plus riche.



Il serait également peut-être intéressant de vérifier si la vibration ne donne pas une augmentation de l'adhérence en majorant l'effet de moulage des aspérités des armatures.

La vibration permet aussi quelquefois le décoffrage immédiat; mais son avantage principal est la régularité, qualité qui s'observe dans deux ordres d'idées différents :

- I) Régularité des résistances malgré les écarts de granulométrie;
- II) Régularité des résistances mesurées sur divers échantillons d'une même fabrication (fig. 40). Cette régularité est mise en évidence en construisant les courbes d'erreur de GAUSS pour des bétons vibrés et des bétons tassés.

La vibration est mise en œuvre pratiquement par les procédés les plus variés qui se divisent en trois catégories.

- 1° Vibration de coffrage latérale ou sur fonds de moule;
- 2° Vibration superficielle;

3° Pervibration ou vibration à l'intérieur de la masse (vibrateur enfermé dans une enveloppe étanche).

Nous avons vu ce qu'il fallait penser de la vibration superficielle : à ce type se rattachent les poutrelles vibrantes, les vibro-herses ou les vibro-piloneuses.

Une liquéfaction se produit, mais elle n'est pas due à la destruction du frottement interne : sous l'action du pilonnage, le béton est légèrement serré comme il le serait sous l'action d'une dame et l'eau en excès donne cet aspect liquide à la partie supérieure.

Au barrage de Marèges, M. COYNE, Ingénieur et Chef des Ponts et Chaussées, a essayé d'utiliser un béton sec : mais il a constaté la forma-



tion de « nids de cailloux » qui nuisaient à l'étanchéité, si bien qu'il a fallu augmenter la proportion d'eau et ajouter du sable fin pour diminuer le frottement interne, puisque la vibration superficielle est pratiquement sans action sur lui.

La ségrégation se produit parce que le serrage est faible et par conséquent l'état d'équilibre stable impossible.

Par un phénomène très particulier on évite, dans ce cas, la ségrégation en ajoutant du sable fin et de l'eau, ce qui est contraire à la logique, puisqu'on diminue le frottement interne et que l'on favorise par conséquent les mouvements relatifs des grains de diamètre différent :

dans le cas présent, la diminution du frottement favorise le serrage et par conséquent l'obtention d'un équilibre stable.

Les conclusions données par M. COYNE ne sont valables que dans le cas de la vibration superficielle : le succès de la mise en œuvre du béton sec est illusoire — il faut augmenter le poids des vibreurs pour augmenter le rendement...; elles s'expliquent par les considérations précédentes.

Les mêmes idées se dégagent des résultats obtenus en vibrant superficiellement le béton de route (SOLIDITE — Chantier de Pierrefitte).

La pervibration est par contre un procédé excellent puisqu'elle assure un serrage très constant : l'appareil, sous l'action du changement de densité du mixte, remonte automatiquement dès que celle-ci atteint une valeur déterminée : on voit donc que ce procédé assure une très grande régularité; cela explique les avantages que tout le monde reconnaît à la pervibration. Elle fonctionne dans les conditions de la théorie dont nous avons parlé, son seul inconvénient résidant dans la gêne qu'apporte la présence des armatures.

Il faut ajouter aussi un procédé qui tient à la fois du moulage à la presse et de la vibration : la centrifugation dans laquelle la force centrifuge remplace l'action de la pression ordinairement exercée à la partie supérieure du mixte, les vibrations qui se produisent pendant la rotation ajoutant leur effet : la très grande cohésion assure des résultats excellents et permet le décoffrage immédiat.

Au Chantier du Pont de Gueuroz (Suisse) (M. BOLOMEY), on utilise le mixte suivant : ciment 350 kg., ballast (0,20 m/m) 1.920 kg., eau 160 litres et des vibreurs sur coffrage de 60 m/m C.P.O.A.C. qui ont une fréquence de 5.000 coups minute et un poids de 7 kg. 500. Principales conclusions : la consistance plastique convient le mieux pour le béton vibré — la vibration se transmet mieux et à une plus grande distance dans un béton plastique — souvent l'augmentation de résistance est nulle, mais la mise en place est facilitée — dans des cas spéciaux la vibration donne de très bons résultats — le voisinage de blocs importants réduit le rendement.

Le chantier de Dunkerque (fabrication de blocs à la mer — M. BROQUAIS, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées) a dressé le tableau suivant au cours d'essais de perméabilité de béton vibré :

Pervibrateur.	2.467	0.0973
Vibroplat.	2.437	0.2298
Vibroplat et aiguille.	2.437	0.0677
Coffrage.	2.457	0.0199

On voit que le même mélange a été utilisé dans des vibrations très différentes : par suite des chiffres donnés sont extrêmement suspects :

il fallait, pour comparer les divers appareils, adapter à chacun un mixte spécial.

Cette erreur se retrouve dans de très nombreux rapports : *il n'existe pas une granulométrie optimum valable dans tous les cas mais, en fonction du but cherché et de la mise en œuvre choisie, il existe un mixte optimum valable dans un cas seulement.*

Il est bien certain que très souvent les sujétions imposées par ce procédé rendent impossible la réalisation parfaite des conditions nécessaires à l'obtention de bons résultats et d'un bon rendement, mais le problème de la vibration est d'abord un problème de cohésion et de frottement interne qu'il faut proportionner à la puissance du vibreur.

Il est aussi doublé de problèmes secondaires dont il est souvent difficile de faire l'étude *a priori* : le principal est celui de la transmission des vibrations. Ce problème a été étudié au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées.

Il resterait à voir comment interviennent exactement les deux facteurs fréquence et accélération ou amplitude.

Si nous supposons sinusoïdaux les mouvements de la plate-forme vibrante, leur équation espace-temps

$$x = a \cos \omega t$$

donne
$$\frac{dx}{dt} = -a \omega \sin \omega t$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -a \omega^2 \cos \omega t$$

l'accélération maximum $\frac{d^2x}{dt^2} = -a \omega^2$ est liée à l'amplitude pour une

fréquence déterminée. Nous pouvons aussi la mettre sous la forme

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A = a (2\pi F)^2 \quad F \text{ étant la fréquence.}$$

Malheureusement, nous avons rencontré de très grandes difficultés pour réaliser un dispositif expérimental satisfaisant et pensé qu'il serait intéressant de pouvoir faire varier la fréquence dans une très large mesure : les Anglais, au Laboratoire du Comité des Recherches Techniques, utilisent une table dont la fréquence varie de 3 à 12 kilocycles par minute.

D'autre part, il serait intéressant de pouvoir mesurer quantitativement la répartition d'énergie absorbée par les différentes zones de la masse vibrée.

Nous pensons qu'il serait possible de réaliser ces dispositifs en employant des courants alternatifs à fréquence variable produits par un montage hétérodyne. La difficulté réside dans l'obtention d'un appareil capable de transformer les vibrations électriques en vibrations mécaniques.

En outre, nous pensons utiliser un montage alimentant un quartz piezo-électrique afin d'obtenir des fréquences nettement différentes de celles utilisées jusqu'ici.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Cohésion des Corps solides

Vu et approuvé :

Paris, le 5 Juillet 1939.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Ch. MAURIAN

Vu

et Permis d'imprimer :

**Le Recteur de l'Académie
de Paris,**

G. ROUSSY



